БИБЛИОТЕКА ГУТЕНБЕРГА

Андрей Мурачёв

ЗАГАДКИ КОСМОСА

ПЛАНЕТЫ И ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Аванта

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

В этой книге речь идет об удивительных небесных телах – экзопланетах. Эти планеты вращаются не вокруг нашего Солнца, а вокруг других звезд. Разнообразие видов экзопланет поражает воображение: горячие газовые гиганты и холодные мини-копии Нептуна, миры-океаны и суперземли, обращающиеся вокруг своих звезд или свободно плывущие в космическом пространстве. Что собой представляют эти миры? Как ученым удалось их обнаружить? И, конечно, есть ли там жизнь? Добро пожаловать в захватывающее путешествие! Для широкого круга читателей.

- Андрей Сергеевич Мурачёв
-
- Предисловие
- Глава 1. Птолемей и Коперник
- Глава 2. Астероиды и формирование планетных систем
- Глава 3. Браге, Галилей и Кеплер
- Глава 4. Телескопы и люди
- Глава 5. Джоселин Белл, пульсары и тайна первой планеты
- Глава 6. Метод радиальных скоростей и Галактика, полная странных планет
- Глава 7. Транзитный метод и космические телескопы
- Глава 8. Марс и миграция планет
- Глава 9. Меркурий и металлические миры
- Глава 10. Татуин и неразбериха с двойными системами
- Глава 11. Гершель и спутники планет-гигантов
- Глава 12. Блуждающие миры и гравитационное микролинзирование
- Глава 13. Клайд Томбо и ледяные миры
- Глава 14. Суперземли и мини-Нептуны
- Глава 15. Жизнь и история Земли
- Глава 16. Марсианские бактерии и поиски внеземной жизни
- Список источников
- notes
    - 1
    - 2
    - 3
    - 4
    - 5
    - 6
    - 7
    - 8

- ○ 9
- ○ 10
- ○ 11
- ○ 12
- ○ 13
- ○ 14
- ○ 15
- ○ 16
- ○ 17
- ○ 18
- ○ 19
- ○ 20
- ○ 21
- ○ 22
- ○ 23
- ○ 24
- ○ 25
- ○ 26
- ○ 27
- ○ 28
- ○ 29
- ○ 30
- ○ 31
- ○ 32
- ○ 33
- ○ 34
- ○ 35
- ○ 36
- ○ 37
- ○ 38
- ○ 39
- ○ 40
- ○ 41
- ○ 42
- ○ 43
- ○ 44
- ○ 45
- ○ 46
- ○ 47
- ○ 48
- ○ 49
- ○ 50
- ○ 51
- ○ 52

- ○ 53
- ○ 54
- ○ 55
- ○ 56
- ○ 57
- ○ 58
- ○ 59
- ○ 60
- ○ 61
- ○ 62
- ○ 63
- ○ 64
- ○ 65
- ○ 66
- ○ 67
- ○ 68
- ○ 69
- ○ 70
- ○ 71
- ○ 72
- ○ 73
- ○ 74
- ○ 75
- ○ 76
- ○ 77
- ○ 78
- ○ 79
- ○ 80
- ○ 81
- ○ 82
- ○ 83
- ○ 84
- ○ 85
- ○ 86
- ○ 87

Андрей Сергеевич Мурачёв
Загадки космоса. Планеты и экзопланеты

© Мурачёв А. С., 2020
© ООО «Издательство АСТ», 2020

Предисловие

Моей маме, с любовью и благодарностью

Начните читать эту книгу поздно вечером, когда стемнеет. Выйдите на балкон вашей квартиры или веранду дома и посмотрите на небо. Я надеюсь, оно сегодня не затянуто тучами. Внимательно посмотрите на черную пустоту над головой… Не читайте дальше, пока не надышитесь холодным ночным воздухом, не разглядите мерцание звезд, не найдете известные вам созвездия. Проникнитесь осознанием того, что не только вы за многие тысячелетия стояли и дышали холодным ночным воздухом, завороженно глядя на усыпанное звездами небо. Миллион лет назад наши предки в африканской саванне точно так же смотрели на небо, и точно так же делали древние шумеры, египтяне, индейцы майя, строители Стоунхенджа. Свои взгляды в разверзнувшуюся над головой бездну устремляли Леонардо да Винчи, Ньютон, Коперник и миллиарды других людей, имена которых уже никто никогда не вспомнит, они навсегда ушли в небытие – точно так же сейчас на небо смотрите вы. О чем думали те люди в такие мгновения? Как их мысли, родившиеся звездными ночами, изменили человеческую историю?

Силой воображения покиньте Землю, Солнечную систему, поднимитесь над плоскостью Млечного Пути и летите дальше – летите до тех пор, пока не потеряетесь, не окажетесь одни в черной пустоте и уже не будете знать, где Земля, Солнце и наша галактика. В этой пустоте не существует ни верха, ни низа, движение неразличимо: вы сейчас двигаетесь или нет? Невозможно определить. Да это и неважно – все равно здесь нет никаких ориентиров и даже знакомых созвездий.

Огоньки, которые вы видите, – это галактики. В видимой Вселенной галактик насчитывается, по разным оценкам, от нескольких сотен миллиардов до двух триллионов[1]. В Млечном Пути от 100 до 400 миллиардов звезд, и по размеру он особо не выделяется на фоне бесчисленных галактик Вселенной. Согласно последним подсчетам треть солнцеподобных звезд имеют планеты[2]. Но сказать, сколько всего планет в нашей галактике, довольно сложно, так как это число зависит от среднего количества планет у каждой звезды. Чаще всего речь идет об одном триллионе. Применяя эту логику на всю обозримую Вселенную, мы получим количество планет, которое записывается числом с 24 нулями. Это в миллион раз больше, чем песчинок на

всех пляжах мира. Так что когда вам будут говорить о Земле, крошечной пылинке в масштабах Вселенной, помните, что даже песчинку на Земле найти проще, чем Землю во Вселенной.

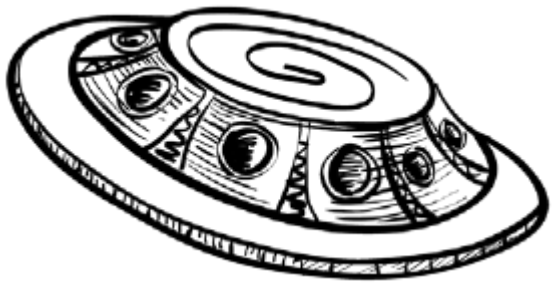
Оглянитесь вокруг и запомните эту картину. Однажды ваши потомки тоже увидят эти звезды, космические корабли откроют им новые миры, и те чудеса природы, которые вы даже не можете себе представить, станут для них обыденностью. Когда-то ваши прапраправнуки будут смотреть на звездное небо далекой планеты, ставшей им домом, и дышать морозным ночным воздухом. Сейчас мы находимся в самом начале этого долгого пути.

Когда-то космос был маленьким – его размеры ограничивались для людей твердой небесной сферой. Шли века, представления о космосе менялись. Земля как центр Вселенной уступила место Солнцу, а потом и Солнце стало рядовой звездочкой на периферии Галактики. Естественным образом возникла мысль найти жизнь где-нибудь за пределами Земли. Так как никаких других планет, кроме планет Солнечной системы, наша цивилизация долгое время не знала, мы обратили внимание именно на них.

Видимо, первым об инопланетянах заговорил Джордано Бруно. Потом была целая плеяда писателей и мыслителей (их уже, к счастью, не сжигали), которые в разные времена помещали инопланетян на Луну, Венеру, Марс, Юпитер, кольца Сатурна и даже поверхность Солнца. Но XX век стал веком стремительного сокращения мест, где, по представлениям ученых, можно найти жизнь. На Луне, например, жизнь уже очень давно не ищут. Еще до того, как Нил Армстронг ступил на ее поверхность, было ясно: Луна представляет собой изрытую кратерами пустыню. Однако еще в 1940-х и даже 1950-х годах в научно-популярной литературе широко обсуждалась возможность обнаружить если не леса и диких животных, то хотя бы лишайники на Марсе. Некоторое разочарование наступило в 1976 году, когда космические аппараты, созданные в рамках программы «Викинг», передали на Землю снимки поверхности и результаты проведенных на Красной планете экспериментов. Тогда стало понятно, что если на Марсе и есть жизнь, то лишь микробная. В жизнь на газовых гигантах Солнечной системы продолжали верить люди только с очень живой фантазией; в экзогортов в Главном поясе астероидов не верил никто, исключая фанатов «Звездных войн».

Жизнь на Марсе (а с недавнего времени и его колонизация) порой кажется навязчивой идеей человечества. Если жизни там нет, то ее следует придумать, ну или, на худой конец, создать.

Годы исследований с помощью орбитальных космических аппаратов и планетоходов убедительно доказали, что в далеком прошлом Марс покрывали реки и океаны жидкой воды, а на полюсах до сих пор лежат шапки водяного льда. Когда астробиолог слышит о месте, где есть жидкая вода с необходимым количеством минералов, у него срабатывает безусловный рефлекс – возникает мысль о существовании внеземной жизни. Помня о невероятной живучести некоторых видов бактерий, ученые задают вполне резонный вопрос: могли ли эти организмы дожить до наших дней, например, в подповерхностных водоемах?



И дальше начинаются чудеса. Жидкая вода была обнаружена под ледяной поверхностью спутников Юпитера и Сатурна. Более того, найдены свидетельства, что она есть и на экс-планете Солнечной системы Плутоне – возможно, целый подповерхностный океан. Кто мог такое представить всего несколько лет назад? Сколько жидкой воды в поясе Койпера, остается лишь догадываться. Есть надежда, что в ближайшее десятилетие состоится миссия к Европе – спутнику Юпитера, обладающему океаном жидкой воды, скрытым под многокилометровой толщей ледяной оболочки. Может быть, уже на нашем веку мы найдем жизнь где-то еще в Солнечной системе.

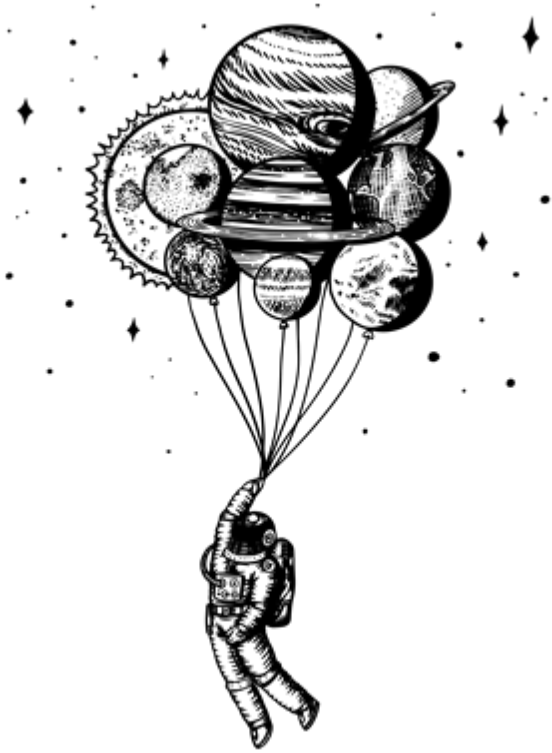
В то время как одни ждут миссии к Европе, другие обсуждают открытие планет за пределами нашей Солнечной системы – их называют экзопланетами. Космический телескоп *Kepler* позволил нам получить информацию о тысячах экзопланет. Сейчас на орбите работает его преемник – телескоп *TESS*, который должен открыть еще тысячи близких к нам экзопланет. Имея в распоряжении всего восемь планет, мы и представить не могли, насколько разнообразны инопланетные миры. Каждая из планет Солнечной системы уникальна, о каждой написаны книги. И если вы захотите удивить девушку, расскажите ей о кратерах на Меркурии, в которых есть лед, о металлических снегах Венеры, о

каньонах Марса, о гигантском вихре на Юпитере, бушующем уже сотни лет, и гелиевых дождях в его атмосфере, о спутнике Сатурна Энцеладе, где подо льдом, возможно, есть жизнь, о горах и равнинах Плутона. И если такое разнообразие наблюдается только в нашей Солнечной системе, сколько всего неизведанного и прекрасного ожидает нас во Вселенной на планетах у других звезд? Сколько идей для рассказов своей половинке вы сможете почерпнуть, исследуя эти миры! О *Trappist*-1, 55 Рака *e, Kepler*-168 *f* и других экзопланетах, которых тысячи. И если половинка вас выслушает, вероятно, между вами действительно серьезные чувства.

Как вы увидите, исследование планет – это увлекательная работа, словно детективная история, изобилующая крутыми поворотами сюжета и неожиданными развязками. Порой ее выполняют в угоду чьим-либо корыстным устремлениям, но порой и ради бескорыстного служения науке. Прежде всего, эта работа интересна не тем, что позволяет получить новые знания об окружающем мире, – она помогает осознать ничтожность человеческой фантазии в сравнении с чудесами, которые приготовила для нас Вселенная. Человеку, посвященному в ее тайны, остается только удивляться и восторгаться.

В дальнейшем на страницах этой книги я обрисую контуры разворачивающейся на наших глазах революции. Знаем мы пока не очень много, но все же в некоторых вещах мы уверены. Например, что экзопланеты существуют, а также нам кое-что известно об их характеристиках. Этого уже достаточно, чтобы строить гипотезы, проверять их, подтверждать или опровергать.

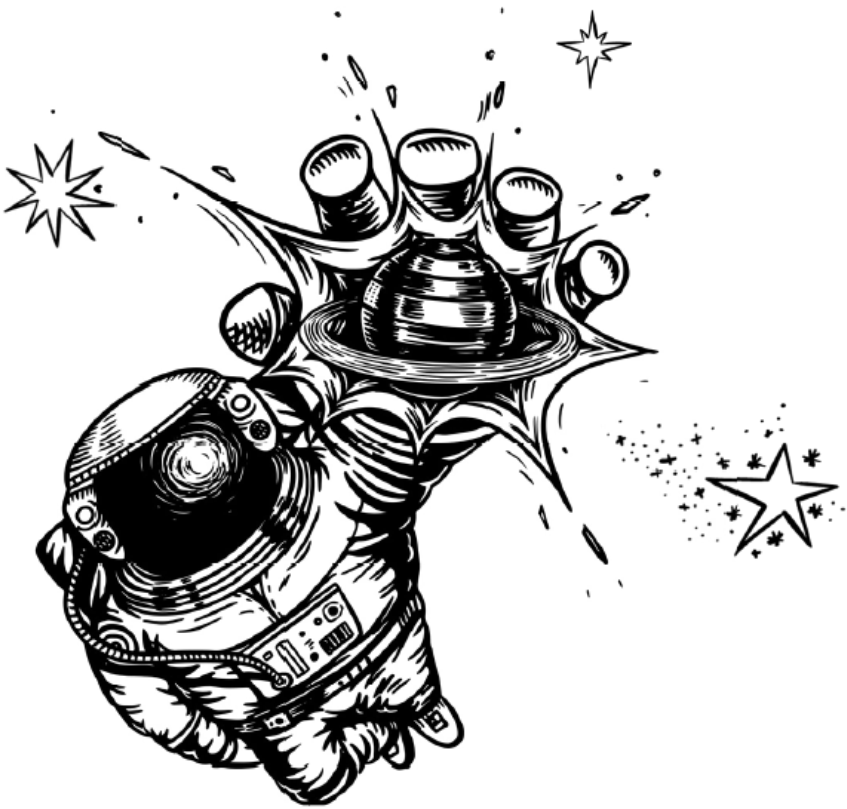
Еще должен отметить следующее. В этой книге есть ссылки на работы, где вы сможете найти дополнительную информацию о приведенных фактах или открытиях. Такой подход продиктован не только правилами научной этики. Мне бы очень хотелось, чтобы хотя бы некоторые читатели внимательно изучили эти статьи. Ведь в них описывается нечто невероятно важное для науки – методы, благодаря которым удалось получить те или иные знания. Пройдя путь, по которому кто-то уже прошел, и увидев ту же картину, что и ваш предшественник, вы удостоверитесь, что вас не обманули. Формируя свое мировоззрение, необходимо не только иметь знания, но и понимать, как они были добыты. Я буду считать свою задачу выполненной, если эта книга подтолкнет кого-то заняться наукой профессионально или посвятить часть времени изучению нашей удивительной Вселенной, открывающейся нам все больше и больше с каждым днем.



Глава 1. Птолемей и Коперник

Геометрия – это искусство хорошо рассуждать на плохо выполненных чертежах.

НИЛЬС АБЕЛЬ



Астрономия – это древнейшая наука, которая возникла на заре цивилизаций и формировалась в ранних человеческих сообществах: шумеров, древних египтян, древних греков и римлян и независимо у инков. Конечно же, на протяжении веков она была не наукой в том смысле, который сегодня мы вкладываем в это понятие, а именно системой знаний, удовлетворяющих формальным требованиям математической строгости и логической непротиворечивости. В те времена астрономия, как и медицина, математика и даже астрология, была просто набором утверждений, основанных большей частью

на мифологии и наблюдениях за миром. Тех цивилизаций уже давно нет, однако их наследие органично вплелось в нашу культуру, стало основой для развития наших взглядов на мир. Здесь, пожалуй, самым ярким примером является шестидесятеричная система счисления, доставшаяся нам от шумеров и вавилонян, которую мы используем для измерения времени и углов. Названия дней недели и их количество пришли извилистыми путями из вавилонской и античной культур. Когда-то давно дни недели получили свои названия в честь богов, с которыми отождествлялись семь известных с древних времен движущихся по небу небесных тел: Солнце, Луна, Марс, Меркурий, Юпитер, Венера, Сатурн.

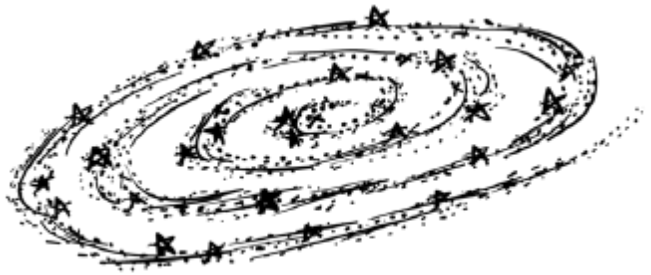
В античной культуре сформировался фундамент астрономии, возникла первая астрономическая парадигма, которая будет разрушена только в ходе научной революции в Западной Европе. Конечно, древние греки были не первыми, кто создал миф об устройстве мира и роли планет и звезд в этом мире, однако именно им удалось разделить мифологию и практические знания о мире, заложить основы научного мировоззрения, которое в полной мере проявится в совершенно другой цивилизации в совершенно другое время. До них ни один народ не испытывал природу на прочность с такой яростью, не создавал такие хитроумные инженерные приспособления.

И именно в Древней Греции возникла и стала общепринятой геоцентрическая система мира, в которой Земля располагается в центре Вселенной. К сожалению, мы многого не знаем о развитии астрономии в Древней Греции и разнообразии античных представлений об устройстве небес. Известно, что, наряду с геоцентрической моделью мира, существовали и другие, в том числе те, которые по достоинству оценили даже наши современники. Например, Аристарх Самосский предлагал модель, где все планеты (включая Землю) вращались вокруг Солнца[3]. Если бы ему повезло чуть больше, возможно, гелиоцентризм стал бы господствующей парадигмой намного раньше Средних веков. Кроме того, в Греции разными философами рассматривались комбинированные модели, согласно которым по крайней мере часть планет вращалась вокруг Солнца, а Солнце – вокруг Земли.

Главной астрономической книгой античного мира стал, безусловно, «Альмагест» Клавдия Птолемея, который появился в середине II века н. э. Птолемей, возможно, впервые в истории человечества собрал в одном месте все доступные к тому моменту астрономические знания. Опираясь на звездный каталог другого древнегреческого астронома – Гиппарха, – в своей книге он привел список 1 022 звезд, 48 созвездий, решил некоторые задачи, имевшие практическое значение, и описал использовавшиеся на практике астрономические приборы. В Европе книга приобрела известность в переводе на арабский язык – благодаря арабам она и получила свое окончательное название («Альмагест» можно перевести с арабского как «Величайший трактат»). Первоначально же труд назывался скромно: «Математическое построение». Самым важным в «Альмагесте» является, пожалуй, подробное изложение усовершенствованной геоцентрической системы мира.

Если смотреть с позиций нашего времени, Птолемей может показаться одним из первых астрономов, но и он «стоит на плечах гигантов». Птолемей жил в Александрии или рядом с ней и, по-видимому, имел доступ к знаменитой Александрийской библиотеке. В ней хранились записи наблюдений астрономов за звездами почти за 900 лет. Свою модель устройства мира Птолемей создавал, изучая эти труды и руководствуясь ими.

Вселенная, по мысли Птолемея, состояла из семи сфер планет (слово «планета» в переводе с греческого означает «странник»), обращающихся вокруг Земли, и на каждой из них было закреплено по одному небесному телу – от Луны до Сатурна. Звезды располагались на восьмой сфере, окружавшей семь подвижных сфер планет. А снаружи этих сфер находилась девятая сфера, которая рассматривалась как источник движения всего грандиозного механизма.



Представления о геоцентризме на самом деле восходят еще к Пифагору, Платону и Аристотелю, жившим за несколько веков до Птолемея. Птолемей не был создателем этой концепции. Но что он действительно сделал первым, так это с помощью математики описал движение небесных светил (некоторые исследователи считают, что эту работу начал еще Гиппарх). И хотя Птолемею удалось достичь неплохой для своего времени точности в предсказании положения планет, сама система получилась довольно запутанной. Вот в чем состояла сложность.

Согласно философской традиции античной Греции мир имеет форму шара, так как шар – самая совершенная фигура. В такой Вселенной планеты должны двигаться по круговым орбитам, причем движение должно быть равномерным (с постоянной скоростью). Однако, с точки зрения наблюдателя на Земле, планеты в течение года движутся по небосводу совсем не по дугам окружностей, а достаточно сложным образом: то вперед в одном направлении, то назад, при этом то ускоряясь, то замедляясь (см. рис. 1).

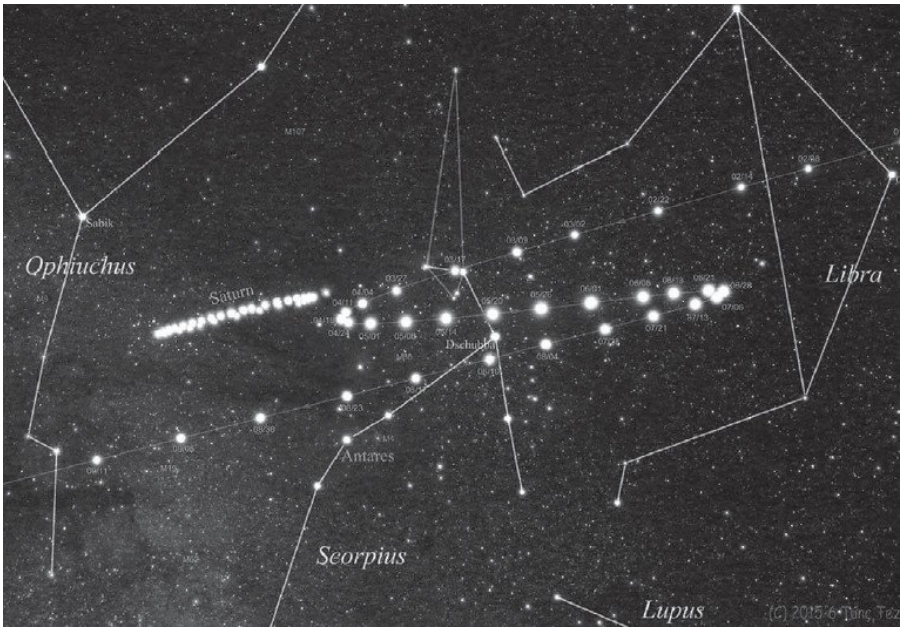


Рисунок 1. Картинка, созданная из серии снимков, сделанных с середины декабря 2015 до сентября 2016 года. На ней запечатлено сближение двух планет: Марса и Сатурна. Их видимое попятное движение относительно звезд дальнего фона – это отражение орбитального движения самой Земли

Пройдет больше тысячи лет, прежде чем человечество осознает, что природе нет никакого дела до наших представлений о красоте. Но во времена Птолемея приходилось привлекать новые сущности для того, чтобы примирить традицию и наблюдения. Одной из таких новых сущностей оказались орбитальные эпициклы. В модели Птолемея каждая планета равномерно движется по окружности, называемой эпициклом, центр которой, в свою очередь, движется вокруг Земли по окружности, известной как деферент. Птолемей аккуратно подобрал размеры эпициклов и деферентов всех известных ему планет, чтобы параметры их орбит максимально соответствовали наблюдаемым.

Существует миф, что древние астрономы должны были множить эпициклы в геоцентрической картине, чтобы удовлетворить более качественным астрономическим наблюдениям, в результате чего система Птолемея чрезвычайно усложнилась. Более десяти веков спустя кастильский король Альфонс X, выслушав объяснение столь запутанного движения планет, высказался так: «Если бы Господь Всемогущий посоветовался со мной, прежде чем приступать к созданию, я должен был бы порекомендовать Ему сотворить мир попроще»[4].

Некоторые авторы пишут, что количество эпициклов у ряда планет (например, у Марса) могло доходить до двухсот. Если бы это соответствовало действительности, древним астрономам было бы очень утомительно вычислять сотни эпициклов вручную, да и вряд ли это вообще посильно.

Клавдий Птолемей

На самом деле, чтобы объяснить неравномерность движения планет по орбитам, Птолемей усложнил первоначальную систему иным способом. Центр деферента (эксцентрик) в его системе не совпадает с центром Земли, а движение центров эпициклов планет устроено так, что кажется равномерным из некоторой другой точки – экванта. Эквант же расположен симметрично

центру Земли относительно эксцентрика (см. рис. 2).

Рисунок 2. Движение планеты согласно модели Птолемея

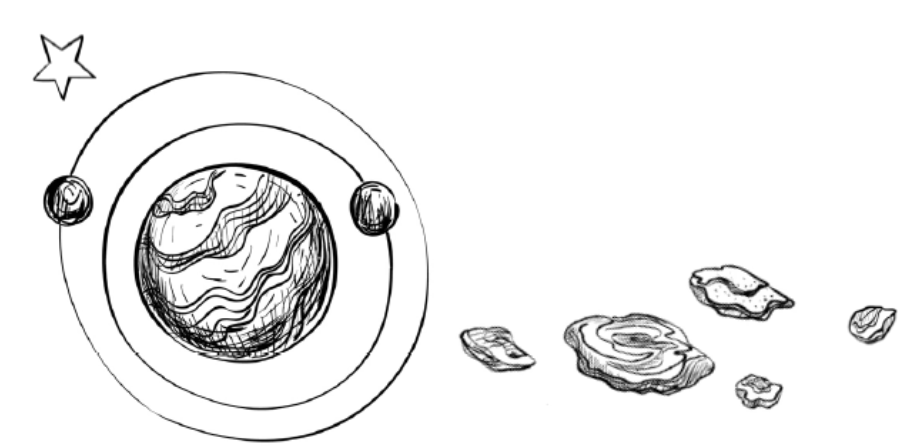
Система Птолемея в конечном счете оказалась неверной. К сожалению (или к счастью), это судьба большинства научных теорий. И все же она позволяла верно предсказывать многие результаты наблюдений невооруженным глазом. К тому же идея о разложении сложного движения на простые круговые, восходящая к Пифагору, являлась не только правильной по своей сути, но и пророческой: идеи Пифагора и Птолемея предвосхитили гармонический анализ.

Падение античного мира привело к упадку культуры и науки. Уже Блаженный Августин в IV веке отрицает сферическую форму Земли. Довольно быстро центр развития астрономии смещается на восток. Снова геоцентрическая картина мира приходит в Европу в IX веке вместе с частичным переводом «Альмагеста» с арабского языка. Полный перевод этой книги на латынь сделали выдающиеся астрономы эпохи Возрождения Георг Пурбах и его ученик Региомонтан только в середине XV века.

В этом же веке в польском городе Торунь родился создатель гелиоцентрической системы мира – Николай Коперник. За время своего обучения он был студентом трех университетов: Краковского, Болонского и университета Падуи. Бросив учебу в двух первых, каждый раз ровно через три года, Коперник только в 1503 году становится доктором канонического (церковного) права, попутно изучив астрономию и медицину. В те времена духовная карьера была одной из самых престижных и денежных, поэтому неудивительно, что в качестве основной он выбрал ее. Этому способствовало и то, что дядя Коперника, Лука Ватцельроде, имел сан епископа Эрмеландского и всячески покровительствовал племяннику.

В 1512 году Ватцельроде умирает, и Коперник отправляется во Фрауенбург, чтобы стать каноником Вармийского капитула, куда его зачислили еще пятнадцать лет назад при содействии дяди. По прибытии ему отводят комнату в северо-западной башне крепостной стены, окружавшей собор, и по счастливой случайности она оказывается невероятно удобной для астрономических наблюдений. Здесь Коперник обустраивает свою обсерваторию и усиленно работает над созданием концепции

гелиоцентрической системы мира. Если вы представили себе астронома в колпаке, смотрящего в телескоп на ночное небо, немедленно усмирите свою фантазию! Первые астрономические наблюдения с помощью телескопа проведет только через сто лет Галилео Галилей. Коперник же пользовался стандартным набором астрономических инструментов того времени: квадрантами, трикветрумами и астролябиями. Однако он не был кабинетным ученым, принявшим добровольное затворничество. Он занимался врачебной практикой, активно участвовал в административной и общественной жизни, командовал обороной Ольштына, небольшой крепости в Польше, – в общем, вел довольно интересную светскую жизнь по меркам того времени.



По-видимому, первые наброски концепции гелиоцентрической системы мира были сделаны Коперником в 1506 году, они разошлись в нескольких списках среди его ближайших друзей. Коперник никогда не скрывал свои исследования, но и широкой огласке не предавал. На протяжении многих лет знаменитый астроном работал над книгой «О вращении небесных сфер». Фактически закончив ее уже в 1530-м, Коперник долго боялся напечатать свой труд и сделал это, лишь поддавшись на уговоры друзей. Только в 1543 году, в те самые дни, когда больной Коперник лежал на смертном одре, вышло первое издание его книги.

Книга Коперника – это своеобразная полемика с Птолемеем. «О вращении небесных сфер» структурно, хоть и в более компактном виде (шесть книг вместо тринадцати), повторяет «Альмагест». Коперник сразу отвергает точку зрения Птолемея, объяснившего неравномерность годового движения планет, введя экванты. Следуя Аристотелю, Коперник утверждает, что на небесах можно найти только равномерное круговое движение, и

строит систему, которая для него эстетически более привлекательна – с равномерным движением планет по круговым орбитам. Чтобы объяснить неравномерность движения он заменяет эквант на второй эпицикл (немного ранее Регимонтан доказал возможность такой замены). Далее происходит чудо. Проведя вычисления для всех известных планет, Коперник (наверное, сам того не ожидая) обнаруживает, что математически легче описать эту систему, перенеся Солнце в центр Вселенной, а Землю сделав третьей планетой от Солнца. После такой замены многие вещи, казавшиеся непонятными в геоцентрической системе, получают естественное объяснение[1]. Например, система Птолемея, в отличие от гелиоцентризма, не дает ответа на вопрос, почему движение Солнца и Луны никогда не бывает попятным или почему эпицикл Марса намного больше эпициклов Юпитера или Сатурна.

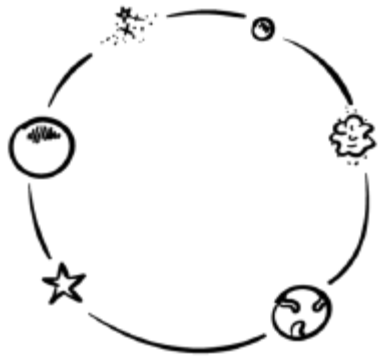
Однако, как вы успели заметить, система Коперника получилась не проще, чем у Птолемея. К тому же она была не более точна, чем современный ему геоцентризм (ведь обе теории основывались на одних и тех же астрономических таблицах). Зачем же она была нужна в таком случае? Скорее, это вопрос психологии, а не научной объективности. Во времена Коперника не существовало ни одной рациональной причины предпочесть одну теорию другой. Доказательства гелиоцентризма появятся много позднее. По-видимому, основной силой, что мотивировала Коперника на создание новой теории, стали его соображения о красоте.

Коперник, безусловно, считал, что созданная им модель отражает истинное положение вещей, однако его современники отнеслись к гелиоцентризму скорее как к математическому фокусу, который, как и систему Птолемея, можно было использовать для вычислений, совершенно не заботясь об истине[2]. Чтобы утвердиться в науке, гелиоцентризму требовались новые открытия и бóльшая точность в предсказаниях положения небесных тел, что станет возможным позднее благодаря наблюдениям Галилея и открытию Кеплером законов движения планет. При жизни Коперник не получил должного признания.

* * *

Система мира, предложенная Коперником, инициировала дискуссию о строении Солнечной системы и в конечном счете об устройстве всего мироздания. Прошли столетия, и сегодня наши

знания о Вселенной, звездах и планетах несравнимо больше. Давайте остановимся на некоторых ключевых вещах, чтобы в дальнейшем говорить на одном языке.



История нашей Вселенной началась в далеком прошлом, 13,8 миллиарда лет назад, с события, которое называют Большим взрывом. Что это такое, чем он был вызван и можем ли мы вообще говорить о его причинах – точного ответа на эти вопросы не знает никто. Между тем Большой взрыв является неотъемлемой частью современной космологической теории. В соответствии с сегодняшней научной парадигмой в ходе Большого взрыва была создана вся материя Вселенной, и стало возможным говорить о пространстве и времени. С того момента пространство расширяется, температура Вселенной падает, а вещество и энергия эволюционируют согласно строгим физическим законам.

В течение первых нескольких минут после Большого взрыва образовались водород и гелий, а также некоторые другие легкие элементы в ничтожно малых количествах. Сегодня масса всего водорода Вселенной составляет около 75 % массы видимого вещества, а всего гелия – около 25 %. Я говорю «видимое вещество», поскольку есть и невидимое, так называемая темная материя. Она взаимодействует с видимым (обычным) веществом лишь посредством гравитации. Согласно последним космологическим моделям, темной материи в три раза больше, чем видимого вещества. Тем не менее о ее природе до сих пор мало что известно.

После того как температура Вселенной снизилась примерно до 1 000 кельвинов (К)[3], гравитация стала преобладающей силой во Вселенной. Под действием гравитации гигантские облака газа сжимались, их плотность возрастала, зажигались первые звезды. Со временем они стали объединяться и образовывать локализованные структуры – галактики. В каждой

галактике могут быть сотни миллиардов звезд. В нашей галактике Млечный Путь содержится, по разным оценкам, от 100 до 400 миллиардов звезд.

Все, о чем шла речь до этого, относится к космологии – разделу астрономии, изучающему Вселенную как целый объект, ее фундаментальную структуру и эволюцию во времени. Что касается менее масштабных объектов исследования, строение различных небесных тел и физические процессы, происходящие в них, изучает астрофизика.

Недра звезд – это своего рода термоядерные печи, плавильни, где идут реакции термоядерного синтеза, в которых атомные ядра более легких химических элементов в условиях высокой плотности и гигантских температур сливаются друг с другом и превращаются в атомные ядра более тяжелых элементов. Жизнь звезды – это вечное противостояние между силой тяжести, которая стремится сжать звезду, и силами газового и лучистого давления. Последние направлены наружу от центра звезды и, не будь гравитации, превратили бы звезду в облако разреженного газа. На протяжении большей части времени, пока в звезде идут термоядерные реакции, ни одна из сил не может победить окончательно, а размер и масса звезды существенно не меняются – звезда находится в состоянии равновесия. Поддерживает это равновесие энергия, выделяющаяся в ходе термоядерных реакций, а ее излишки покидают звезду в виде излучения.

Все звезды разные, они отличаются друг от друга размером, температурой и светимостью. В начале XX века двое ученых, Эйнар Герцшпрунг и Генри Норрис Рассел, практически одновременно предложили способ систематизировать все это разнообразие. То, что они представили научному обществу, с тех пор называется «диаграмма Герцшпрунга – Рассела» (см рис. 3). По оси абсцисс (x) на этой диаграмме отложена температура видимой поверхности звезды, а по оси ординат (y) – светимость (количество энергии, излучаемое звездой за одну секунду). Каждой звезде во Вселенной соответствует свое место на этой диаграмме. Герцшпрунг и Рассел заметили, что если нанести известные им звезды на диаграмму, то они не заполнят ее пространство равномерно, а локализуются в трех областях. Вдоль диагонали лежат звезды так называемой главной последовательности: от горячих и ярких голубых гигантов в верхнем левом углу до тусклых и холодных красных карликов[4]. В верхнем правом углу сгруппировались красные гиганты и сверхгиганты, а в левом нижнем – белые карлики.

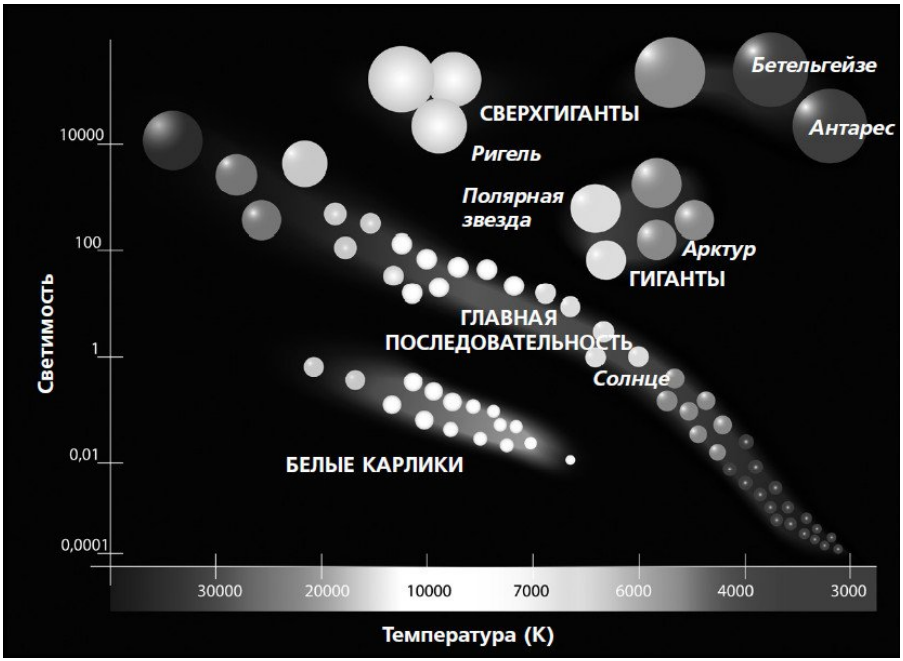


Рисунок 3. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела

Диаграмма Герцшпрунга – Рассела интересна также тем, что позволяет увидеть основные этапы жизни звезды. Как только звезда образуется, она попадает на главную последовательность, в место, определяемое ее массой (чем больше масса звезды, тем она ярче). На главной последовательности она находится бóльшую часть своей активной жизни. Например, наше Солнце – типичная звезда главной последовательности, половина жизни которой уже прошла. Постепенно, когда у звезд заканчивается водород, им становится труднее генерировать энергию, гравитационная энергия превращается в тепловую, запускаются реакции синтеза гелия. В течение этого времени звезды сходят с главной последовательности, раздуваются и краснеют, превращаясь в красных гигантов или красных сверхгигантов. Постепенно весь доступный внутри звезды гелий заканчивается, и начинаются реакции синтеза углерода. Дальнейшая судьба звезд зависит от их массы.

Одним звездам, массой до 8–10 масс Солнца, уготовано долгое и безмятежное угасание. Температура в центре таких звезд не сможет повыситься настолько, чтобы запустились реакции горения углерода и синтеза более тяжелых элементов. Гравитация постепенно побеждает, и звезда медленно сжимается в размерах до тех пор, пока не становится белым карликом – объектом, радиус которого не превышает несколько радиусов Земли. В нем уже не идут ядерные реакции, и его светимость в десятки тысяч

раз меньше светимости Солнца. На диаграмме Герцшпрунга – Рассела белые карлики локализованы в нижнем левом углу.

Конец жизни других звезд, с большими массами, грандиозен. В их недрах вслед за синтезом углерода начинаются реакции синтеза более тяжелых элементов, что продолжается вплоть до образования железа, но дальше реакции ядерного нуклеосинтеза внутри звезды идти не могут – это принципиальный момент, и никакие температуры не способны это изменить. Когда образуется железное ядро, давление и температура внутри него начинают расти и достигают таких значений, что протоны и электроны сливаются вместе, превращаясь в нейтроны. В этот момент, длящийся считанные секунды, гравитация побеждает окончательно. Нейтронное ядро коллапсирует, а вслед за ним сами на себя обрушиваются и верхние слои звезды. Удар получается настолько сильным, что после этого слои отскакивают обратно в космос. Высвобождается огромное количество энергии. На короткое время светимость звезды становится сравнимой со светимостью всех звезд Галактики. Этот взрыв называется «сверхновая звезда». После вспышки сверхновой звезды на ее месте образуется нейтронная звезда (как видно из названия, звезда эта состоит в основном из нейтронов) – ее типичный диаметр всего полтора десятка километров.

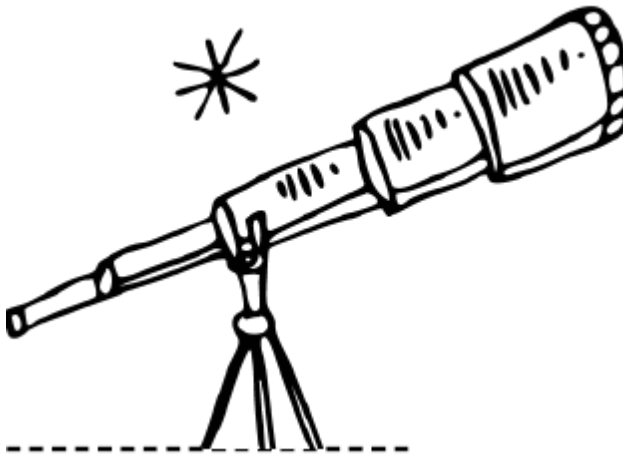
При взрывах сверхновых происходит и еще кое-что очень важное – вместе с гигантским количеством энергии в пространство выбрасываются неиспользованный водород с внешних оболочек звезд и образовавшиеся в процессе термоядерного синтеза химические элементы. Более того, во время этого взрыва образуются самые тяжелые химические элементы – те, которые имеют бóльшую атомную массу, чем у железа, и образование которых в недрах звезд невозможно. Взрывы сверхновых формируют красивые туманности, и из их вещества могут рождаться звезды следующего поколения со своими планетными системами. Солнце – звезда третьего поколения, и это означает, что материал, из которого оно состоит, побывал в ядерных топках двух звезд.

Астрономы разделили все звезды главной последовательности на семь классов – *O, B, A, F, G, K* и *M* – в зависимости от особенностей их цвета[5]. Так, классу *O* соответствуют звезды голубого цвета, они самые горячие, с температурой 30 000–60 000 К и массой от 16 масс Солнца, а к классу *M* – холодные красные звезды массой в десятые доли масс Солнца. Само Солнце относится к классу *G* и по этой классификации считается желтым карликом.

Звезды эволюционируют с разной скоростью, которая зависит

прежде всего от массы звезды. Чем больше звезда, тем меньше она будет жить. Это кажется контринтуитивным, но все встает на свои места, если вспомнить, что термоядерные реакции идут лишь в центре звезды, в области, размер которой зависит от внутреннего давления в звезде. Чем более массивна звезда, тем с большей скоростью вещество переплавляется в ее ядре и тем быстрее она эволюционирует. Так, самые массивные звезды главной последовательности живут от нескольких миллионов до пары десятков миллионов лет. Старея и все больше увеличивая свою светимость и температуру, они никогда не позволят развиться углеродной жизни на любой из своих планет. Звезды солнечного типа, желтые карлики, существуют на главной последовательности около 10 миллиардов лет, пока у них в ядре не закончится водородное топливо и они не станут красными гигантами. Когда это произойдет с Солнцем, примерно через 4,5 миллиарда лет, оно увеличится в размерах настолько, что поглотит Меркурий, Венеру и, возможно, даже Землю. Красные карлики живут до 10 триллионов лет.

Итак, сегодня мы неплохо понимаем эволюцию материи в нашей Вселенной – эволюцию галактик, межзвездного газа и самих звезд. Но повествование в этой книге сосредоточено на планетах и экзопланетах. До недавнего времени единственной планетной системой, о которой мы знали хоть что-то, была наша Солнечная система. Она состоит из восьми планет, пяти карликовых планет и бессчетного числа малых тел, таких как астероиды, транснептуновые объекты и кометы. В Солнечной системе выделяют три зоны. Первая зона – каменистые планеты. Их еще называют внутренними планетами Солнечной системы или планетами земной группы. Это Меркурий, Венера, Земля и Марс. Земля самая тяжелая и большая из этих планет. Вторая зона состоит из газовых и ледяных гигантов, в противовес внутренним планетам их называют внешними планетами Солнечной системы. Их тоже четыре: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Масса самой легкой из этих планет, Урана, в 14,6 раз больше массы Земли, а масса самой тяжелой, Юпитера, превосходит массу Земли более чем в 317 раз. Первую и вторую зоны разделяет Главный пояс астероидов.



За орбитой Нептуна начинается третья зона – пояс Койпера, область пространства, «населенная» миллионами небольших каменно-ледяных объектов самых разных размеров, вплоть до объектов размером с Плутон (а может, и более крупных). В поясе Койпера находится четыре из пяти карликовых планет Солнечной системы: Плутон, Хаумеа, Макемаке и Эрида. Единственная карликовая планета, расположенная не там, а внутри орбиты Нептуна, – Церера. Радиус карликовых планет не превышает 1 000 км. Считается, что за поясом Койпера простирается облако Оорта – сферическая область пространства, которая служит источником посещающих внутренние части Солнечной системы долгопериодических комет. Вот, собственно, и все – довольно просто, не так ли?

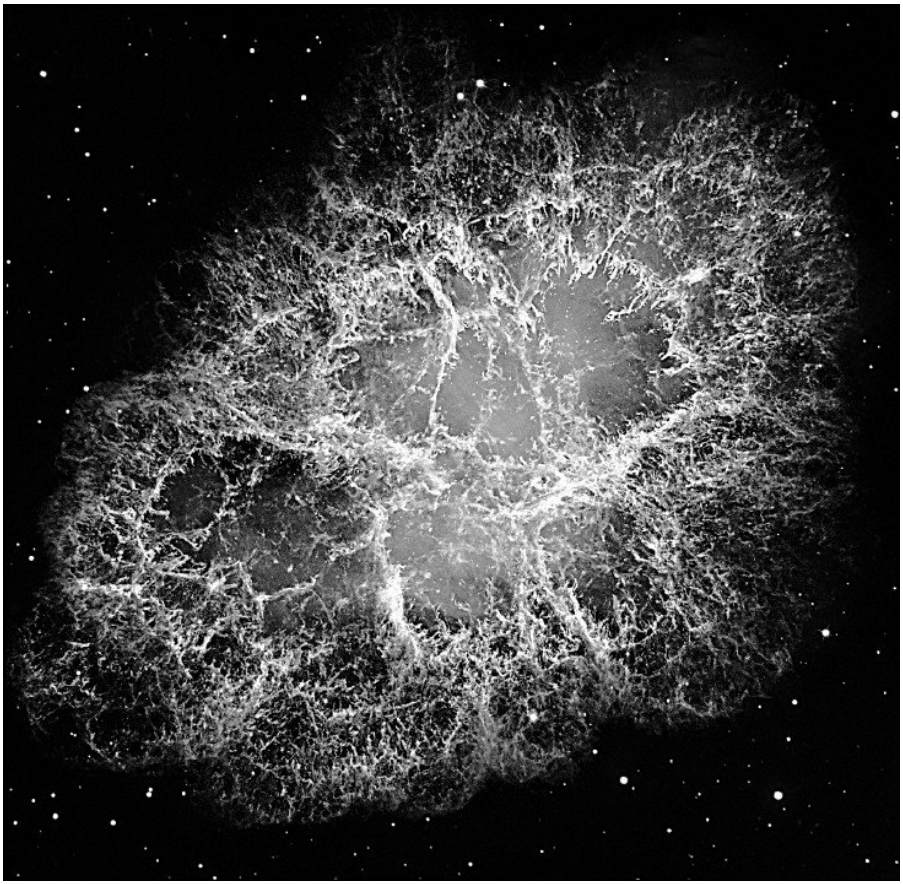
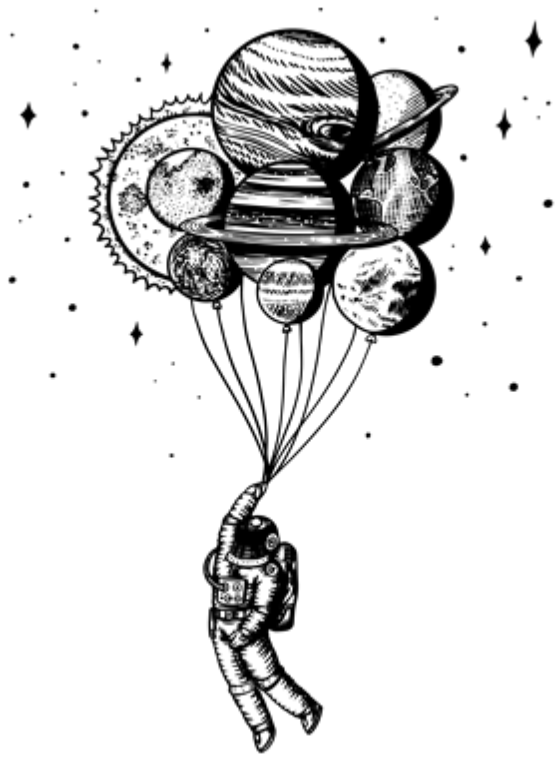


Рисунок 4. Мозаичное изображение крабовидной туманности, составленное из 24 снимков, сделанных телескопом «Хаббл»

Последнее, о чем стоит упомянуть перед тем, как мы пойдем дальше, это определение масс и расстояний. На Земле для измерения этих величин мы пользуемся граммами и метрами. Эти единицы измерения выбраны из соображений удобства, нам хочется, чтобы все, с чем мы имеем дело, измерялось в чем-то, что можно посчитать, причем желательно должно хватить пальцев на обеих руках. В граммах и килограммах удобно измерять массу продуктов питания, а в метрах и километрах – расстояние от одного дома до другого. Однако массы и расстояния в космосе настолько огромны, что привычные нам единицы измерения перестают быть информативными. Интуитивно разница между триллионом и квинтиллионом километров совершенно не ощущается, ведь такие цифры в обычной жизни не встречаются. И потому астрономы часто используют специальные единицы. Массу планет принято измерять в массах Земли или Юпитера. Значки для них следующие: $M_\oplus$ и M_J соответственно. Массы звезд

измеряются в массах Солнца ($M_\oplus$). Для определения величины радиусов планет и звезд используют, как вы уже догадались, радиусы Земли ($R_\oplus$) и Солнца ($R_\odot$). Но даже это мелочи по сравнению с межпланетными и межзвездными расстояниями. Радиусы орбит планет принято измерять в астрономических единицах. Одна астрономическая единица (1 а. е.) равна среднему расстоянию от Земли до Солнца, что составляет примерно 150 миллионов километров. Между звездами расстояния в сотни тысяч и миллионы раз больше, поэтому для того, чтобы сказать, как далеко от нас расположена, к примеру, Проксима Центавра – ближайшая к Солнцу звезда, – обычно используются световые годы (да, это мера расстояния!) и парсеки (пк). Световой год (св. год) равен пути, который свет проходит за один год, то есть примерно 9,5 триллиона километров, а в одном парсеке содержится 3,26 св. года. В этих единицах расстояние от Солнца до Проксимы Центавра составляет 4,24 св. года, или 1,3 пк. Диаметр Млечного Пути равен 100 000 св. лет. Перевести в километры можете на досуге сами[6].



Глава 2. Астероиды и формирование планетных систем

Я видел дальше других только потому, что стоял на плечах гигантов.

ИСААК НЬЮТОН

Утром 15 февраля 2013 года жители Города услышали громкий рев с неба. Казалось, небеса разверзлись и вот-вот появится знамение, которое точно не будет предвещать ничего хорошего. Кто-то решил, что началась война и в небо уже взмыли военные самолеты, а кто-то подумал об аварии на одном из

расположенных в Городе промышленных заводов. Между тем по небу двигался огромный огненный шар, а за ним тянулся шлейф черного дыма. Это был метеорит – заплутавший астероид, завершавший свое долгое космическое путешествие. Вдруг раздался громкий взрыв, и наблюдателей ослепила яркая белая вспышка. Тени домов скользнули по тротуарам и исчезли. Цвет вспышки мгновенно пожелтел, а затем потемнел до оранжевого. Позже выяснится, что на высоте 15 км астероид не выдержал сопротивления атмосферы и разрушился на тысячи мелких осколков. Не одну неделю жители Города и ученые будут искать в его окрестностях оставшиеся от метеорита железные капли.

Подлетая к Земле, астероид был диаметром 20 м и весил 13 000 т. Взрыв высвободил энергию, которая сейчас оценивается в 450–500 кт в тротиловом эквиваленте, что почти в 30 раз превышает мощность атомных бомб, превративших Хиросиму и Нагасаки в радиоактивный щебень. Ударная волна, поразившая Город, существовала 32 с, обернувшиеся бесконечностью для его жителей. Прокатившись по городу, она выбила окна в квартирах и офисах, разбила семейные сервизы, тысячи людей пострадали от острых осколков, многие попали в больницы. Люди с ужасом стояли и смотрели в небеса, а по всему Городу выли автомобильные сирены, мобильные сети не работали, матери не могли дозвониться до своих детей, а те – до родителей. В истории это событие сохранилось как падение Челябинского метеорита.

Астероиды – это каменные глыбы неправильной формы, вращающиеся вокруг Солнца. Размер астероидов мал для того, чтобы они считались планетами, а от комет их отличает отсутствие большого количества льда на поверхности и круглые орбиты. В любую безоблачную ночь вы можете увидеть пронзающие атмосферу «падающие звезды» – это метеоры. Так называют обломки астероидов, которые полностью сгорают при попадании в атмосферу планеты. Метеоритами именуют те части небесных тел, которые достигли поверхности планеты, не разрушившись полностью.

Челябинску, конечно, повезло: будь астероид чуть крупнее или войди он в атмосферу под другим углом, от города могли бы остаться только руины. Челябинский метеорит очень наглядно показал, насколько человечество слабо и беззащитно перед силами природы. Если извержения вулканов и наводнения мы порой способны предсказать и заранее эвакуировать людей, то метеорит может упасть в любую минуту, даже сейчас, в любую точку нашей планеты.

Несмотря на то что астероиды представляют собой потенциальную угрозу, эти тела могут рассказать нам много

интересного о Солнечной системе. Пока я пишу эти строки, несколько космических аппаратов исследуют околоземные астероиды. Например, с июня 2018 года японский аппарат «Хаябуса-2» изучает астероид Рюгу, а 31 декабря 2018 года американский аппарат *OSIRIS-REx* вышел на орбиту вокруг астероида Бенну. Он уже обнаружил кое-что интригующее: выбросы частиц с поверхности астероида – как будто там взрываются гейзеры[5], но однозначного объяснения причин этого явления пока нет. «Хаябуса-2» уже взял образцы астероидного вещества, а *OSIRIS-REx* еще только готовится это сделать. В 2020-х годах аппараты доставят грунт на Землю для более тщательного исследования в лабораториях.

До недавнего времени изучение астероидов ограничивалось лишь теми из них, которые попали на Землю в виде метеоритов. Метеоритное вещество находят повсюду. В Москве, в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, например, хранится одна из самых крупных коллекций метеоритного вещества в мире. Здесь можно увидеть такие метеориты, как *Ensisheim* – первый зарегистрированный в мировой истории метеорит, упавший во Франции в 1492 году; Бородино – метеорит, упавший накануне Бородинского сражения в расположение русских частей; *Weston* – метеорит, узнав о котором президент США Томас Джефферсон заметил: «Легче поверить в то, что два профессора-янки врут, чем в то, что камни падают с неба»[7]; и конечно же, осколки Челябинского метеорита и многих других.

Мы можем исследовать астероиды не только после того, как они попали на Землю и стали метеоритами, или после того, как образцы их вещества были доставлены на Землю космическими аппаратами. Для изучения состава космических объектов астрономы используют спектральный анализ. Весь свет, который мы можем регистрировать измерительными инструментами или своими глазами, отраженный или излученный, можно разложить на пучки света с одинаковыми длинами и частотами волн[2][8]. Частота и длина волны обратно пропорциональны друг другу: чем больше длина волны, тем меньше частота. Пучки света с одинаковой длиной волны воспринимаются нами как имеющие определенный цвет: красный, синий, желтый и так далее. На уроках физики свет обычно раскладывают по длинам волн с помощью призмы, а в природе порой после дождя мы видим радугу – такое же разложение солнечного света. Чем больше длина волны (и меньше частота) в рассматриваемых нами пучках света, тем соответствующий им цвет ближе к красному концу радуги, чем длина волны короче (и больше частота) – тем ближе к

фиолетовому. Но как за красным, так и за фиолетовым краем свет не перестает существовать – просто человеческий глаз уже не способен его увидеть. За красным, в сторону увеличения длины волн (и уменьшения частоты), идет сначала инфракрасное излучение, а затем микроволновое и радиоизлучение. За фиолетовым концом цветовой шкалы, в сторону уменьшения длины волн, следуют ультрафиолетовое, рентгеновское, и гамма-излучение. Таким образом, видимый свет – это лишь узкая полоска в куда более широком диапазоне частот электромагнитного излучения.

Но помимо того что свет имеет определенную частоту, он обладает и определенной интенсивностью, которую в каком-то смысле можно понимать как количество фотонов той или иной частоты в воспринимаемом луче света. Например, чем больше интенсивность красного цвета в луче, тем более красным мы будем видеть свет. Совокупность всех длин волн света и соответствующих этим длинам волн интенсивностей называется электромагнитным спектром. Наука, занимающаяся изучением спектров различных веществ, называется спектроскопией; приборы, с помощью которых исследуют спектры объектов, – спектрометрами.

Существованием спектроскопии мы обязаны тому факту, что атомы разных веществ по-разному взаимодействуют со светом: некоторые атомы поглощают частоты, а некоторые – отражают. Когда определенная частота падающего излучения поглощается, в спектре – в месте, соответствующем отсутствующей частоте, – появляется черная линия поглощения. Расположение и количество этих линий говорит о химическом составе вещества, а их интенсивность – о концентрации тех или иных атомов. Например, уже полученный спектр света, отраженного от поверхности астероида Рюгу, показывает, что его химический состав близок к составу первичного вещества Солнечной системы. Это означает, что в Рюгу буквально вморожены частицы пыли, которые остались с тех времен, когда около Солнца еще не было планет, а был лишь огромный газопылевой протопланетный диск. Анализ спектров используется не только в астрофизике, но лишь в астрофизике он имеет такое важное значение. По сути, большинство наших знаний о Вселенной так или иначе связано с анализом спектров космических объектов.

Рисунок 5. Фотография ядра кометы Чурюмова – Герасименко, полученная бортовой камерой «Розетты»

Космические аппараты побывали уже на всех типах тел Солнечной системы. Недавно состоялась историческая посадка на комету. В 2014 году спускаемый модуль «Филы» космического аппарата «Розетта» успешно приземлился на поверхность ядра кометы Чурюмова – Герасименко. Ему немного не повезло: при посадке он оказался в зоне тени и не смог пополнить заряд аккумуляторов с помощью солнечных панелей. Однако на том заряде, что у него был, «Филы» успел собрать и передать на Землю данные, полученные встроенными в него научными приборами, выполнив тем самым основную часть своей миссии.

Успехи в таких невероятно сложных миссиях, как «Розетта», «Хаябуса-2», *OSIRIS-REx,* очень важны, поскольку они означают, что человечество обладает технологиями и умениями, необходимыми для исследования далеких космических объектов. По этим миссиям историки будущего будут изучать нашу космическую экспансию.

Сложность каждой миссии можно оценить хотя бы по следующему описанию. Буквально через месяц после того, как «Филы» перешел в режим энергосбережения, к астероиду Рюгу

отправилась «Хаябуса-2». Большая полуось орбиты астероида Рюгу равна 1,18 а. е. Из-за значительного эксцентриситета (степень вытянутости) орбиты в перигелии Рюгу оказывается внутри орбиты Земли, а в афелии[9] – дальше Марса. Таким образом, «Хаябуса-2», прежде чем достигла цели, пролетела 3,2 миллиарда километров (почти 21,5 а. е.) за 3,5 года! Это больше, чем расстояние от Солнца до Урана.

Почему же «Хаябуса-2» летела так долго и преодолела такое значительное расстояние? Из геометрии мы знаем, что самый короткий путь между двумя точками – прямая. На Земле путь по прямой оказывается чаще всего и самым быстрым. Но если дорогу вам преграждает, скажем, гора, гораздо меньше сил и энергии вы затратите, если эту гору обойдете, нежели если будете карабкаться по ней вверх, а потом вниз. Часто вы выбираете обходной путь, даже если на него требуется больше времени. Примерно так же рассуждают инженеры, только для них затраченная на доставку космического аппарата к астероиду энергия конвертируется в топливо, а в конечном счете – в деньги.

Для того чтобы достигнуть небесного тела наикратчайшим путем – по прямой, – космическому аппарату потребуются очень большие запасы топлива, и обойдется это невероятно дорого. В целях экономии инженеры максимально используют гравитационные маневры. Суть этих маневров состоит в том, чтобы за счет своевременного включения двигателей аппарат мог «оттолкнуться» от массивного тела, такого как планета, и изменить свою орбиту на более подходящую, затратив при этом минимальное количество топлива. Обычно гравитационные маневры совершаются в перицентре орбиты аппарата вокруг массивного тела[10]. В этой точке аппарат имеет наибольшую скорость, и даже малое ускорение может кардинальным образом изменить его орбиту. Перемещаясь с орбиты на орбиту с помощью таких маневров, космические аппараты успешно путешествуют по Солнечной системе. Однако каждый оборот на промежуточной орбите может занимать годы, что сильно увеличивает длительность полета. «Хаябуса-2» во время своего путешествия совершила один гравитационный маневр возле Земли и трижды ускорялась, сменив три орбиты.

Помимо дистанционного исследования Рюгу с помощью бортовых камер и научных приборов, «Хаябуса-2» сбросила на астероид четыре небольших мобильных модуля, которые успешно достигли его поверхности. Таким образом, «Хаябуса-2» стала первым космическим аппаратом, спускаемые модули которого совершили посадку на астероид[11]. Из-за слабой гравитации колеса на модулях использовать нельзя (в этом случае они

становятся неуправляемыми). Поэтому инженеры придумали альтернативный способ: модули передвигались по поверхности астероида небольшими прыжками за счет вращения ассиметричного маховика, расположенного у них внутри.

Когда «Хаябуса-2» долетит до Земли[12], образцы вещества, собранные на Рюгу, будут сброшены на Землю в герметичной капсуле для дальнейшего анализа[13], а сам аппарат приступит к новой исследовательской миссии. Впервые в истории доставку астероидного вещества на Землю в 2010 году совершил аппарат «Хаябуса», предшественник «Хаябуса-2».

Взятие образцов осуществлялось в два этапа. Сначала, в феврале 2019 года, производился сбор частиц грунта с поверхности астероида. «Хаябуса-2» в момент максимального сближения с поверхностью астероида выстрелил по ней 5-граммовой танталовой пулей, захватил разлетевшиеся частички грунта, а затем снова поднялся на орбиту. Целью второго этапа, который начался в апреле 2019 года, был сбор образцов из более глубоких слоев грунта. 5 апреля от «Хаябуса-2» отделился 2,5-килограммовый медный снаряд с несколькими килограммами взрывчатки, а сам космический аппарат «эвакуировался» на другую сторону астероида. Затем произошла детонация взрывчатки, и ускоренный медный снаряд направился прямиком к астероиду! Ничего подобного прежде не предпринималось. Ученые могли лишь предполагать, какие последствия вызовет столкновение астероида со снарядом. Когда в конце апреля «Хаябуса-2» вернулся к месту событий, ученые обнаружили, что снаряд оставил на поверхности астероида 10-метровый кратер – это достаточно ценные сведения, исходя из которых можно довольно точно прогнозировать, как поведет себя астероид при более крупных столкновениях. В июле 2019 года «Хаябуса-2» произвел сбор образцов выброшенного из глубины вещества, не подвергавшегося воздействию суровой космической среды[6], в области рядом с кратером. А в ноябре 2019 года японский аппарат сошел с орбиты вокруг Рюгу и отправился домой. Сложность каждого этапа миссии была колоссальной: любой просчет – и многолетний труд сотен людей оказался бы напрасным.

Все эти прошедшие, настоящие и будущие, сложные и дорогостоящие миссии по изучению астероидов и комет необходимы для того, чтобы детально, не упустив ничего важного, разобраться, как некогда скопление газа и пыли вокруг непримечательного молодого желтого карлика превратилось в астероиды и планеты и как в конечном итоге на одной из этих планет появилась жизнь. Какие из условий, возникших около

Солнца, были уникальными, а какие должны были стать повсеместными? Существует ли хоть что-то, что отличает нашу звездную систему от тех миллиардов других, что мы находим в Галактике?

* * *

Проблема происхождения планетных систем, пожалуй, одна из самых интересных и фундаментальных в астрономии. Первую гипотезу, которую можно назвать научной, предложил французский математик и философ Рене Декарт. Согласно его идее Солнце и все планеты сформировались из гигантского газопылевого вихря. Декарт был современником Иоганна Кеплера и Галилео Галилея. К тому времени Коперник уже создал гелиоцентрическую модель и опубликовал трактат «О вращении небесных сфер», а вот Ньютон еще не родился и не изложил свою теорию гравитации в «Математических началах натуральной философии»[14]. Так что вихревая гипотеза Декарта вполне вписывалась в научную парадигму того времени, объясняя устройство Солнечной системы без привлечения гравитации. В XVIII веке усилиями Эммануила Сведенборга[7], Иммануила Канта[8] и Пьера-Симона де Лапласа[9] была разработана теория, которая объясняла формирование Солнечной системы как результат вращательной неустойчивости газопылевой туманности. Эта теория хоть и учитывала гравитацию, но и в ней обнаружились недостатки. Например, сегодня нам известно, что в Солнечной системе на долю планет приходится 98 % момента импульса – величины, характеризующей инерцию вращательного движения, тогда как на долю Солнца лишь 2 %. Согласно же теории Сведенборга – Канта – Лапласа должно было быть наоборот.

В 60-х годах XX века советский астроном Виктор Сергеевич Сафронов опубликовал работу «Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет»[10], ставшую впоследствии классической. Сафронов смог не только создать теорию, объясняющую особенности строения нашей планетной системы, но и предсказать результаты еще не произведенных наблюдений – например, существование протопланетных газопылевых дисков и их кольцевидную структуру. Его идеи получили продолжение в трудах многих ученых. И все это привело к тому, что уже к концу 1970-х годов небулярная[15] (или аккреционная) теория формирования планет казалась единственно верной, практически завершенной и довольно понятной.

Теория Сафронова объясняет многое из того, что мы видим в Солнечной системе и знаем о ней: разделение планет на относительно маленькие каменистые и огромные газовые, расположение орбит всех планет в одной плоскости – экваториальной плоскости Солнца (ее называют плоскостью эклиптики), одинаковое направление обращения всех планет вокруг Солнца (об исключениях вроде Венеры и Урана выдвигались различные версии), химические и физические свойства планет. В общем, это была отличная теория. Однако же в те времена, когда она создавалась, в распоряжении ученых была лишь одна планетная система для исследования – наша. И казалось логичным предположить, что все планетные системы вокруг других звезд, которые мы когда-либо обнаружим, будут похожи на нее, а процесс формирования планет окажется идентичным тому, что произошел когда-то около Солнца. Такой была старая научная парадигма.

Последние десятилетия принесли нам почти экспоненциальный рост числа открытых внесолнечных планет. Мы обнаружили планетные системы со структурой, совершенно не похожей на нашу. Телескопы, которые мы создали, находят газовых гигантов, расположенных ближе к своим звездам, чем орбита Меркурия к Солнцу. Как они туда попали? Мы находим планеты таких типов, которых нет в Солнечной системе. Как они могли образоваться? Планеты и их характеристики перестали укладываться в старую парадигму. То, что мы раньше считали типичным, оказалось если не уникальным, то все же совсем не типичным. И пришлось создавать новую парадигму. Ее формирование еще далеко от завершения, но кое-что понять нам уже удалось.

Начнем с самого начала – молекулярных облаков. Во Вселенной очень много молекулярного газа, состоящего в основном из водорода (~90 %) и гелия (~10 %) с небольшими

примесями других химических элементов. Масса межзвездного газа в Галактике составляет несколько десятков миллиардов масс Солнца. Этот газ не распределен равномерно в галактической плоскости, он собирается в огромные облака. Такие облака могут быть поистине гигантскими – до миллиона масс Солнца – и очень холодными: их средняя температура около –230 °С.

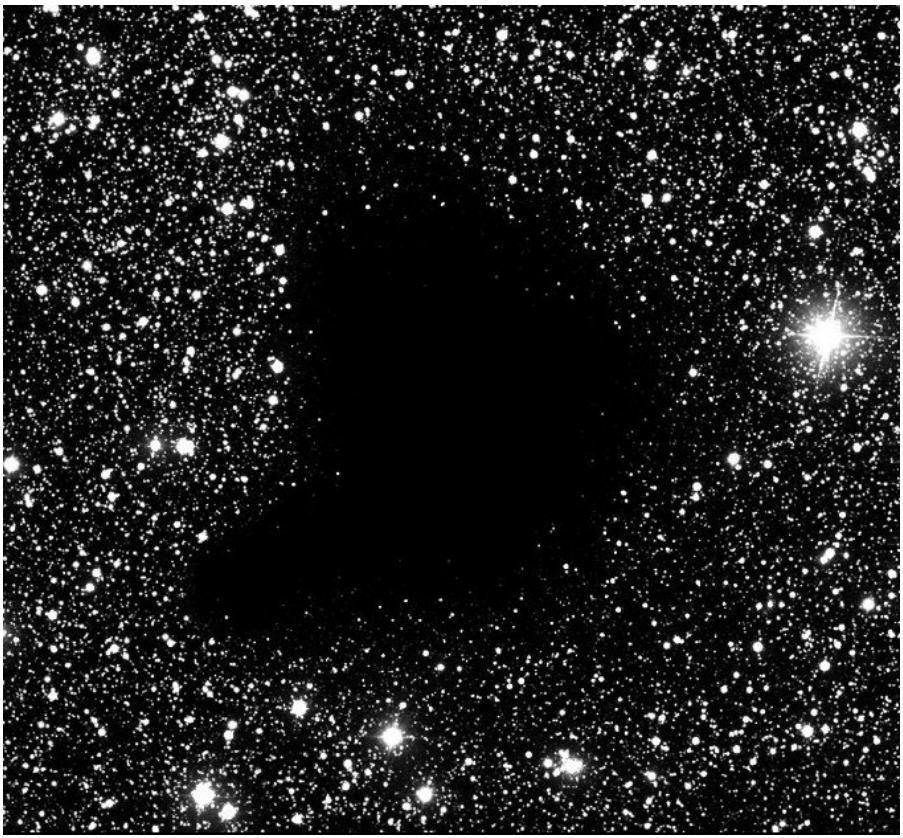


Рисунок 6. Молекулярное облако Барнард 68 в созвездии Змееносца. Изображение получено с помощью 8,2-метрового телескопа «Анту» комплекса *VLT* в Чили

Некоторые из них выглядят как огромные черные провалы. Когда английский астроном Уильям Гершель увидел их в свой телескоп, он подумал, что эти «дыры в небесах» – разрывы в структуре Галактики[11]. Сам по себе газ, конечно, прозрачен, но содержащиеся в облаке пылинки, размером всего в несколько микрон, поглощают практически все оптическое излучение, падающее на них, и облако становится абсолютно черным для наблюдателя. Другие туманности в телескопы выглядят совсем иначе. Например, о туманности в созвездии Ориона тот же Гершель в 1774 году писал как о «бесформенном огненном

тумане, хаотической материи будущих солнц». Он правильно предположил, что в таких облаках происходит процесс звездообразования.

Пройдет 270 лет со дня рождения Гершеля, когда в космос отправится космический телескоп «Гершель» – самый крупный из когда-либо запущенных в космос инфракрасных телескопов. В 2013 году он завершил свою работу, благодаря ему мы многое узнали о процессе формирования звезд, планет и галактик и получили впечатляющие фотографии далеких облаков газа. Как оказалось, эти облака состоят в основном из молекулярного водорода и гелия, пыли и частиц различных видов льда (в основном водяного). Внутри облака́ имеют неоднородную структуру: газ концентрируется в длинные нитеобразные структуры – филаменты, – которые находятся в постоянном движении.

Типичная масса молекулярного межзвездного облака составляет от миллиона до сотен миллионов масс Солнца, а значит, теоретически каждое из них может породить миллионы звезд. Однако такого большого количества звезд из них не формируется: молекулярные облака являются довольно устойчивыми структурами и не склонны к процессам звездообразования. Их равновесие поддерживает внутреннее давление мощных турбулентных вихрей газа. Турбулентные потоки препятствуют разрушению молекулярных облаков под действием сил гравитации, но в относительно малых масштабах влияние этих потоков не столь велико, и коллапс небольших облаков газа все же происходит – так инициируется процесс образования звезд. Например, если рядом с таким облаком, находящимся на грани коллапса, или внутри него взрывается сверхновая или облако сталкивается с другим облаком, то равновесие может быть нарушено.

Считается, что наше Солнце родилось около 4,6 миллиарда лет назад[12] в результате взрыва сверхновой в окрестностях одного из таких молекулярных облаков. Волны сжатия, распространяющиеся по межзвездному газу, приводят к значительному повышению концентрации вещества, и равновесие в некоторых частях облака нарушается. То место, где это происходит, становится центром притяжения, и к нему стекается газ из соседних областей – происходит коллапс участка облака. Размер этого участка газопылевого облака, газ из которого формирует звезду, составляет тысячи астрономических единиц. Коллапс облака напоминает процесс формирования снежного кома, несущегося с горы: газ поступает в центр коллапса все быстрее, его становится все больше. Когда масса газа достигает около 7–8 % от массы Солнца, примерно через десять тысяч лет, начинаются термоядерные реакции и зажигается новая звезда. Но это не единственный возможный путь образования звезд. Исследования некоторых ученых показывают, что инициировать звездообразование могут также столкновения филаментов внутри газопылевого облака[13].

Коллапсирующее облако формирует тонкий диск, окружающий центр коллапса – будущую звезду. Образовавшиеся диски называют протопланетными, потому что в них в скором времени начнется «стройка» планет. Почему вещество оседает на диск, а не равномерно окружает протозвезду? Причины тут две. Первая состоит в том, что коллапс облака из-за неравномерности распределения газа происходит в каком-то одном из трех измерений, причем этот коллапс, опять же из-за неравномерности распределения, придает материи коллапсирующего облака начальное вращение. Вторая причина более фундаментальна:

уменьшение радиуса коллапсирующего облака приводит к тому, что скорость его вращения увеличивается[16], и тут на авансцену выходят центробежные силы. Они препятствуют аккреции (падению)[17] вещества на протозвезду в плоскости вращения и не мешают его падению во всех остальных направлениях. С течением времени масса звезды увеличивается, а в экваториальной плоскости вращения формируется тонкий диск.

Так как протопланетные диски нагреваются излучением звезды, их структуру и свойства лучше изучать в инфракрасном диапазоне – современные телескопы позволяют проводить такие наблюдения. Но современные телескопы позволяют изучать небо в различных диапазонах электромагнитного излучения. На фотографиях, полученных с помощью инфракрасных и субмиллиметровых космических и наземных телескопов, межзвездные облака и протопланетные диски предстают перед наблюдателем во всей красе. Такие телескопы, как уже упоминавшаяся космическая обсерватория «Гершель», спутник *IRAS*, космический телескоп «Спитцер», система телескопов *ALMA*, расположенная в высокогорной пустыне в Чили, телескоп Джеймса Клерка Максвелла и некоторые другие, позволили в прямом смысле заглянуть внутрь протопланетных дисков, увидеть их структуру.

Межзвездные облака, в которых идет процесс интенсивного звездообразования, часто поэтически называют «звездные колыбели». Ближайшее к нам место, где прямо сейчас рождаются звезды, – туманность Тельца – располагается на расстоянии 140 св. лет от нас; интенсивное звездообразование также идет в туманности Ориона и многих других. Как правило, звезды в газовых облаках рождаются группами: чтобы это представить, вообразите себе пчелиный рой, застывший в воздухе, замените каждую пчелу на звезду и поместите этот «рой» в огромное газовое облако.

В молекулярных облаках астрономы находят только очень молодые звезды и почти не находят те, что старше 10 миллионов лет. Это происходит потому, что после рождения «рой» звезд выталкивается приливными силами из своей «колыбели» и начинает самостоятельное движение по галактике, а связанный с ним газ быстро рассеивается. На своем пути звезды, выброшенные из звездных колыбелей, взаимодействуют с десятками других звезд, которые, в свою очередь, тоже находятся в движении. Эти взаимодействия приводят к тому, что постепенно «рой» распадается. Сегодня, когда астрономы наблюдают звезды, они редко могут определить место рождения звезды. Скорее всего, мы никогда не узнаем, где родилось наше Солнце.

Вернемся к новорожденной звезде. Наблюдения подтверждают трехкомпонентную структуру звездообразования: это аккрецирующий со всех сторон на звезду газ, протопланетный диск и… джеты – струи вещества, не поглощенные звездой, «бьющие» из полюсов новой звезды. Их формируют огромные магнитные поля, сопровождающие рождение звезды. По всей видимости, они играют одну из ключевых ролей в звездообразовании, унося вместе с веществом значительную часть момента импульса, позволяя гравитации победить центробежные силы и обеспечить необходимую плотность вещества в звезде для того, чтобы запустить процессы ядерного синтеза.

Что касается самого протопланетного диска, то, очевидно, он состоит из газа, оставшегося от туманности или взрыва сверхновой, и микроскопических (максимум в несколько миллиметров) частичек пыли. Причем масса газа примерно в сто раз превышает массу всей пыли в диске. Протопланетные диски, как правило, обладают радиальной симметрией, поэтому их свойства, такие как температура и поверхностная плотность, зависят только от расстояния до звезды – чем ближе к звезде, тем плотность больше, а температура выше. Молодые, только образовавшиеся протопланетные диски начинаются в непосредственной близости от звезды и простираются на десятки, а иногда и сотни астрономических единиц от нее.

Внутри дисков происходят довольно сложные и до сих пор вызывающие много вопросов процессы. Близкие друг к другу газопылевые потоки, аккрецирующие на звезду, внутри диска взаимодействуют между собой: притягиваются, трутся друг о друга, обмениваются импульсом и веществом, а их скорости уравниваются. Постепенно температура диска падает, наиболее тугоплавкие элементы конденсируются в зерна, свободно плавающие в газе. Постепенно зерна, сталкиваясь друг с другом, вырастают до сантиметровых размеров и оседают в центральной плоскости диска.

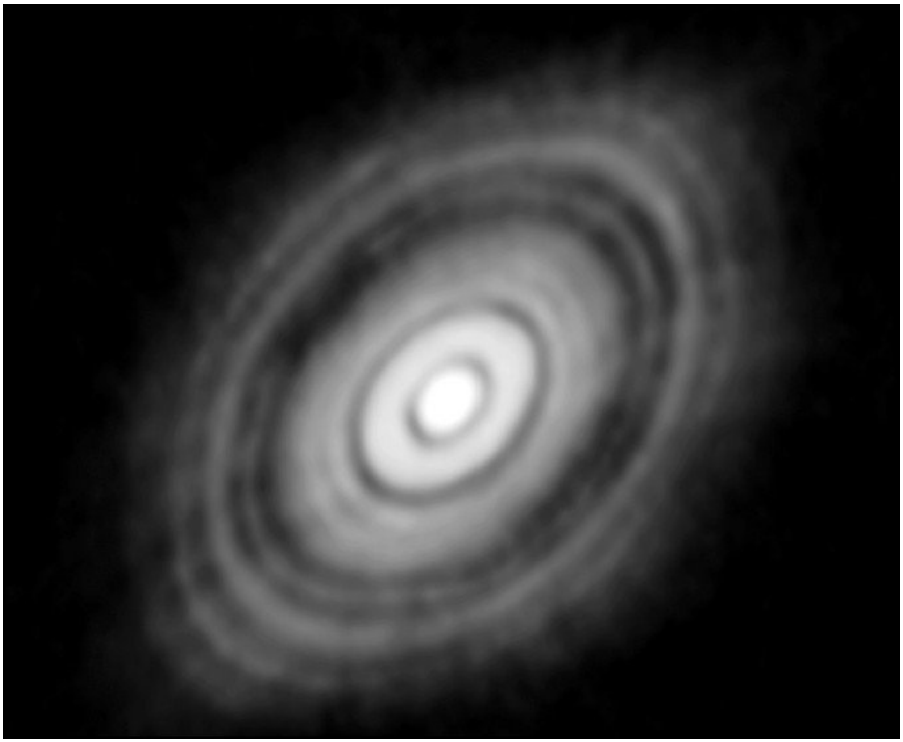
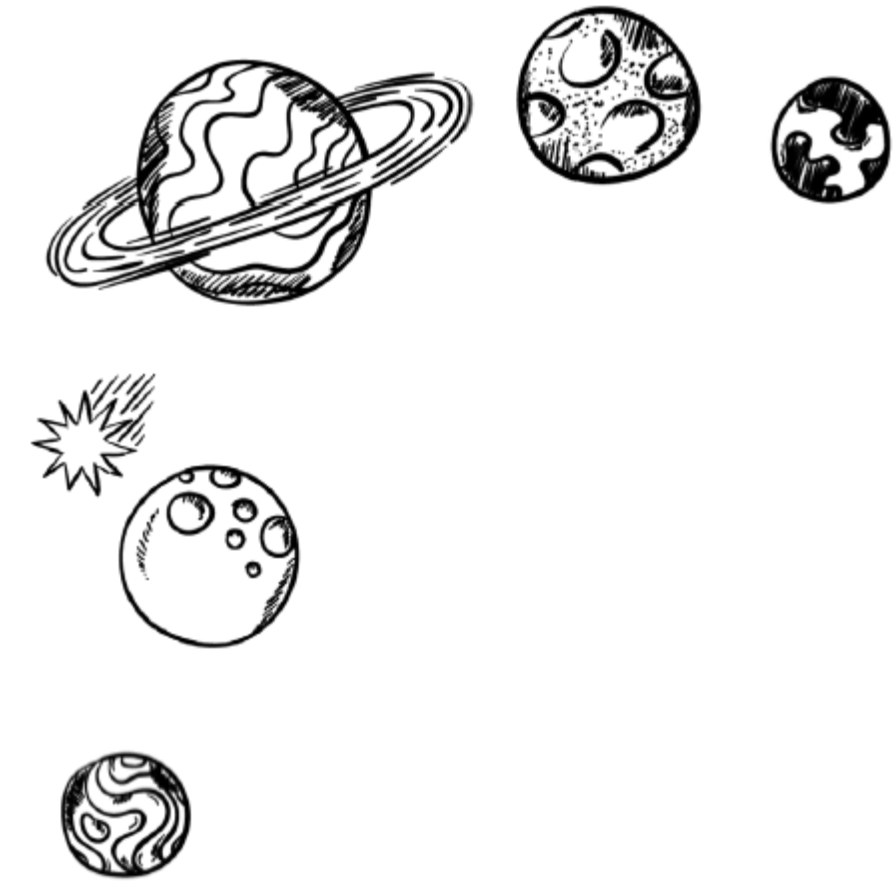


Рисунок 7. Протопланетный диск *HL* Тельца. Изображение получено в миллиметровом диапазоне волн с помощью системы телескопов *ALMA*

Процесс постепенного роста частиц до планет размером с Землю можно условно разбить на три этапа. В рамках первого этапа частицы нанометрового и микрометрового размеров собираются вместе, прилипают друг к другу и образуют пористые агломераты. Такой рост имеет предел. Лабораторные эксперименты[18] показывают, что пылинки в процессе взаимных ударов в протопланетном облаке могут вырасти только до сантиметровых размеров, сохраняя структуру благодаря электростатическим силам[14]. Однако дальше начинаются трудности. При соударениях сантиметровые частицы разрушаются, а не слипаются, и их дальнейший рост, преодоление размера в один метр, оказывается невозможным. Эта проблема ввиду множества неудовлетворительных попыток ее решить даже получила название – «проблема метрового барьера»[19].

Второй этап роста частиц как раз и заключается в преодолении этого барьера. Было выдвинуто немало гипотез, создатели которых подходили к проблеме с самых разных точек зрения. Например, группа доктора Коучи из Университета

Хоккайдо в Японии провела исследование, в котором убедительно показала, что если покрыть частицы очень липким слоем органических молекул, то слипаться в процессе ударов они будут гораздо эффективнее, чем частицы, не покрытые таким слоем[15]. Этим исследователям возражает доктор Эндрю Юдин из Принстона, который уже много лет утверждает, что во всем виновата потоковая неустойчивость – растущие со временем возмущения концентрации частиц (локальное отклонение концентрации частиц от среднего значения) в протопланетном диске. Такие возмущения плотности в конечном итоге способствуют слипанию вещества и образованию крупных объектов[16]. Существуют и другие гипотезы, но, к сожалению, пока еще ни одна из них не стала общепринятой.



Если бы проблема метрового барьера была единственным парадоксом теории протопланетных дисков! Но нет. Например, существует также проблема радиального дрейфа частиц[17].

Несложные математические выкладки показывают, что сила сопротивления, которую газ оказывает на частицы протопланетного диска, становится максимальной для тел размером около метра. Испытывая сильное сопротивление, частицы должны быстро терять орбитальную скорость и падать на звезду – примерно в течение тысячи лет. Таким образом, рост до километровых размеров оказывается невозможен. И все же то, что мы с вами живем на нашей планете, говорит о том, что природа нашла способ преодолеть все эти сложности.

Какими бы ни были механизмы преодоления метрового барьера или устранения проблемы радиального дрейфа, как только частицы достигают километровых размеров (частицы такого размера и больше называют планетезималями), сила гравитации между ними начинает преобладать над газодинамическими силами в диске. Это знаменует начало третьего этапа формирования планет. Уже через несколько сотен тысяч лет появляется множество планетарных зародышей с массами, достигающими марсианской. Окончательно планеты формируются в течение следующих нескольких миллионов лет.

Когда в протопланетном диске в ходе какого-либо динамического процесса (например, движения протопланеты, которая расчищает пространство перед собой) нарушается симметрия распределения вещества, в нем формируются области с более высокой плотностью газа, чем в окружающем пространстве. Такие структуры не «законсервированы» в одном месте, а способны распространяться по диску, словно волны, – поэтому их и называют волнами плотности. Считается, что аккреция вещества на протопланету порождает две смыкающиеся на ней спиральные волны плотности: одна закручивается внутрь орбиты протопланеты, другая – вовне[18]. Хоть наблюдения за протопланетными дисками и дали возможность увидеть в их структуре ярко выраженные кольца и спирали (см. рис. 7), из-за плохого качества изображений эти структуры оставались лишь намеками на формирование в диске планет. Подтверждение теория нашла весной 2020 года, когда было опубликовано великолепное изображение протопланетного диска звезды *AB* Возничего, на котором впервые отчетливо оказались видны два соединяющихся спиральных рукава[19]. Скорее всего, в этом месте мы наблюдаем рост планеты, уже достигшей 4–13 M_J.

По мере удаления от центральной звезды температура газа в протопланетном диске падает, и вот, с некоторого момента, газ начинает конденсироваться и появляются кристаллики льда из аммиака, метана, воды и других веществ. Это очень важный момент. Условная линия, отделяющая в протопланетном диске

участок, где большинство летучих веществ находится в газообразном состоянии, от участка, где эти же вещества пребывают в сублимированном виде (в виде льда), называется снеговой линией. Изменение яркости и температуры звезды в процессе ее эволюции заставляет снеговую линию перемещаться по протопланетному диску. В Солнечной системе снеговая линия водяного льда в протопланетном диске проходила в районе Главного пояса астероидов, между орбитами Марса и Юпитера.

За снеговой линией частички льда играют важнейшую роль в формировании планеты. Масса льда, которую аккумулируют протопланеты, на порядки больше массы аккумулируемых ими твердых частичек. Когда масса формирующейся планеты превышает 10–15 $M_{\oplus}$, планета становится способна притягивать газ из протопланетного облака. Так рождаются газовые гиганты. В Солнечной системе планеты от Меркурия до Марса образовались в условиях относительно высоких температур, а Юпитер и более далекие планеты сформировались за снеговой линией и стали газовыми гигантами.

Стоит отметить, что существует еще один возможный механизм образования газовых гигантов. В протопланетном диске, в сверхплотных рукавах газа и пыли, вращающихся вокруг звезды, спонтанно могут возникать регионы с повышенной плотностью. Некоторые из них сразу же распадаются, а другие, наиболее массивные, существуют тысячи лет, притягивая к себе газ из близлежащих областей. Такое явление называется гравитационной неустойчивостью. Неустойчивость порождает гравитационно связанное газопылевое облако массой в несколько масс Юпитера, которое может достигать в поперечнике 2–6 а. е.[20] Такое возможно лишь во внешнем, расширенном протопланетном диске, который сформировался вдали от своей звезды, за снеговой линией.

Под действием гравитации облако газа, образовавшееся из неустойчивостей, начинает сокращаться в размерах и уплотняться. Этот процесс сопровождается ростом температуры и давления газа в облаке. В конце концов температура в его центре достигает 2 000 К, и молекулы водорода начинают диссоциировать (разделяться на атомы). С этого момента часть энергии идет уже не на поддержание давления газа, а на химические реакции диссоциации. Скорость роста температуры замедляется, гравитация оказывается сильнее давления газа, и облако неудержимо коллапсирует, рождая планету – газового гиганта[21]. Размер планеты определяется равновесием между самогравитацией и давлением газа, а масса зависит от массы породившей планету гравитационной неустойчивости.

Гипотеза гравитационной неустойчивости может объяснить особенности расположения планет-гигантов и их массы, однако для объяснения происхождения каменистых планет Солнечной системы она совершенно не подходит. Так как же образовались планеты земной группы? На этот счет существует несколько конкурирующих гипотез.

Формирование газовых гигантов заканчивается только тогда, когда в результате аккреции и воздействия потока вещества, идущего от Солнца (звездного ветра), околозвездный диск рассеивается. Из данных наблюдений мы знаем, что большинство протопланетных дисков исчезает через 10 миллионов лет после образования звезды, причем среднее время жизни протопланетного диска всего 2–3 миллиона лет[22]. Значит, если газовые гиганты образуются в диске, то это происходит довольно быстро.

Выше я упомянул, что Солнечная система образовалась 4,6 миллиарда лет назад. Как это удалось определить? Метод, с помощью которого можно получить самую точную цифру, пришел в астрофизику из геохимии и называется радиоизотопным анализом. Давайте немного поговорим о нем, ведь благодаря ему мы можем провести датировку основных этапов истории Солнечной системы.

Еще со школы вам знакомы слова «радиоактивный распад». Это явление, при котором одни элементарные частицы распадаются на другие элементарные частицы. Не все частицы подвержены радиоактивному распаду. Например, ^{12}C и ^{14}C – изотопы углерода, которые ведут себя совершенно по-разному. В изотопе ^{12}C содержится шесть протонов, шесть нейтронов и шесть электронов (протоны и нейтроны называются нуклонами, их число равно массовому числу атома химического элемента; массовое число обычно записывается сверху слева рядом с символом химического элемента). В изотопе углерода ^{14}C количество нейтронов на два больше, а количество протонов и электронов совпадает с их количеством в ^{12}C. Химические свойства изотопов идентичны. Однако мир устроен так, что конфигурация атомного ядра с двумя лишними нейтронами не может существовать долго, и один нейтрон в ^{14}C распадается на протон, электрон (обозначается как e^-) и антинейтрино $(\bar{\nu}_e)$. Минус один нейтрон и плюс один протон в ядре ^{14}C приравнивают число протонов и нейтронов друг к другу, превращая атом углерода в азот. На языке ядерной физики данная реакция записывается следующим образом:

$$^{14}C \rightarrow {}^{14}N + e^{-} + \overline{\nu}_{e}$$

Изотоп углерода ^{12}C ведет себя иначе: сколько за ним ни наблюдай, он все равно будет углеродом.

Распад нейтрона – процесс спонтанный. Каждый отдельный нейтрон может распасться когда угодно. Чем больше число нестабильных частиц в эксперименте, тем больше частиц распадается за одну секунду. Однако если взять большую совокупность нестабильных частиц, то время, за которое половина из них распадется, будет примерно одним и тем же, сколько бы раз эксперимент ни проводился. Это время называется периодом полураспада. Он не является каким-то мистическим свойством нестабильных частиц – это математическая характеристика данного случайного процесса. Чем больше частиц вы возьмете, тем точнее сможете определить период полураспада. Радиоактивному распаду могут подвергаться как частицы, находящиеся в ядре, так и свободные частицы, не связанные с атомом. Период полураспада свободного нейтрона равен примерно 10 мин., а находящегося в ядре ^{14}C – около 5 700 лет.

Радиоизотопный анализ используется для того, чтобы установить абсолютный возраст органических материалов, обнаруженных в ходе геологических, палеонтологических и археологических раскопок – это так называемое радиоизотопное датирование. Для находок возрастом до нескольких десятков тысяч лет лучше всего подходит исследование изотопов углерода.

До самой смерти организм обменивается углеродом с окружающей средой. Этот обмен обеспечивает постоянство изотопного состава углерода внутри организма. Когда же организм умирает, обмен прекращается, и содержание в тканях радиоактивного изотопа ^{14}C начинает падать. В лаборатории, чтобы определить концентрацию ^{14}C и ^{12}C, образец исследуется с использованием масс-спектрографа. Полученные с его помощью данные о концентрации изотопов позволяют определить, сколько лет прошло со времени смерти организма.

Для успешного применения этого метода необходимо знать исходное соотношение концентраций атомов ^{14}C к ^{12}C в организме. Еще в середине XX века считалось, что соотношение изотопов углерода постоянно. Но затем выяснилось, что изотопный состав атмосферы может довольно быстро меняться. Сегодня данные, полученные путем радиоизотопного анализа, калибруются по образцам органики, возраст которой удалось определить другими методами (например, подсчитывая годовые

кольца на деревьях).

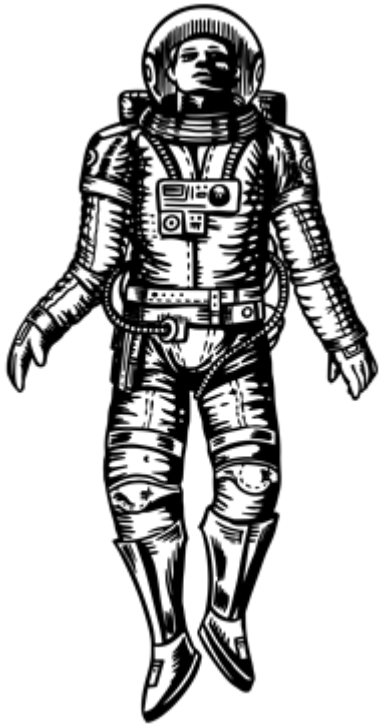
С помощью радиоизотопного датирования определяют и возраст космических тел. Первое отличие между определением возраста древних тканей и, например, метеоритов состоит в том, что в случае с метеоритами, образовавшимися миллиарды лет назад, для анализа следует использовать элементы с периодом полураспада, измеряющимся тоже миллиардами лет.

Второе отличие более серьезно: оно заключается в самой методологии определения возраста. Если бы мы знали начальный изотопный состав протопланетного облака, то по имеющемуся сегодня изотопному составу образца, например метеорита, мы бы легко установили его возраст, как устанавливаем возраст, скажем, берестяной грамоты. Но этой информации у нас нет, как нет в нашем распоряжении и других методов, позволяющих с необходимой точностью узнать возраст метеоритов. Что же делать?

Есть лазейка. Если в материале, наряду с дочерним (постоянно образовывающимся) изотопом некоторого элемента, присутствует его нерадиоактивный изотоп, не являющийся при этом продуктом какого-либо процесса распада, определить возраст возможно. Делается это следующим образом. Одним из самых удобных для исследования элементов, который часто находят в метеоритах, является изотоп рубидия ^{87}Rb. Когда ^{87}Rb распадается (его период полураспада почти 50 миллиардов лет!), он превращается в изотоп стронция ^{87}Sr. Изотоп ^{86}Sr присутствует в метеоритах, но не является продуктом распада. Когда происходит распад рубидия, соотношение ^{87}Rb к ^{86}Sr уменьшается, а соотношение ^{87}Sr к ^{86}Sr увеличивается. Зная это, можно определить начальное соотношение дочерних и не дочерних изотопов и время, которое прошло с момента минерализации изотопов (включения их в состав астероидов). Что подтверждает правильность данного метода, так это то, что анализ изотопного состава разных элементов в метеоритах, упавших на Землю и Луну, дает одну и ту же цифру – 4,56 миллиарда лет. Получается, именно столько лет назад возникла наша Солнечная система и планета Земля.

Проблемы метрового барьера и радиального дрейфа – не единственные тайны, которые нам необходимо разгадать. На страницах этой книги, почти в каждой главе, будут встречаться вопросы без ответов. Планетология давно покинула область мифов, но совсем недавно стала наукой, предсказания которой можно проверить с помощью наблюдений и компьютерных экспериментов. Труд тысяч людей сформировал то научное знание, которое сегодня находится у нас в руках. Мы

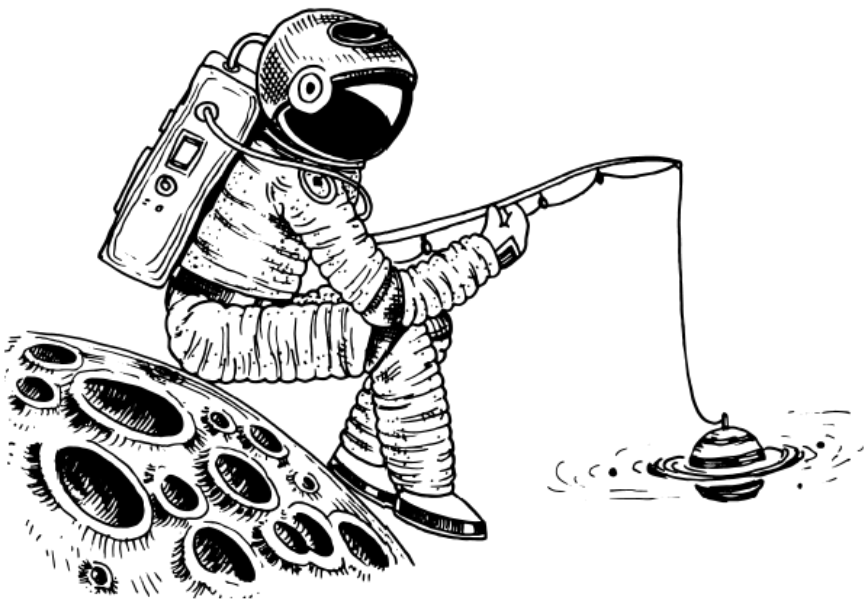
действительно, выражаясь словами Исаака Ньютона, «стоим на плечах гигантов». Новая парадигма складывается прямо сейчас, и мы тому свидетели.



Глава 3. Браге, Галилей и Кеплер

Но жребий брошен; я пишу свою книгу. Прочтут ли ее мои современники или потомки, это неважно – она дождется своего читателя.

ИОГАНН КЕПЛЕР.
ГАРМОНИЯ МИРА

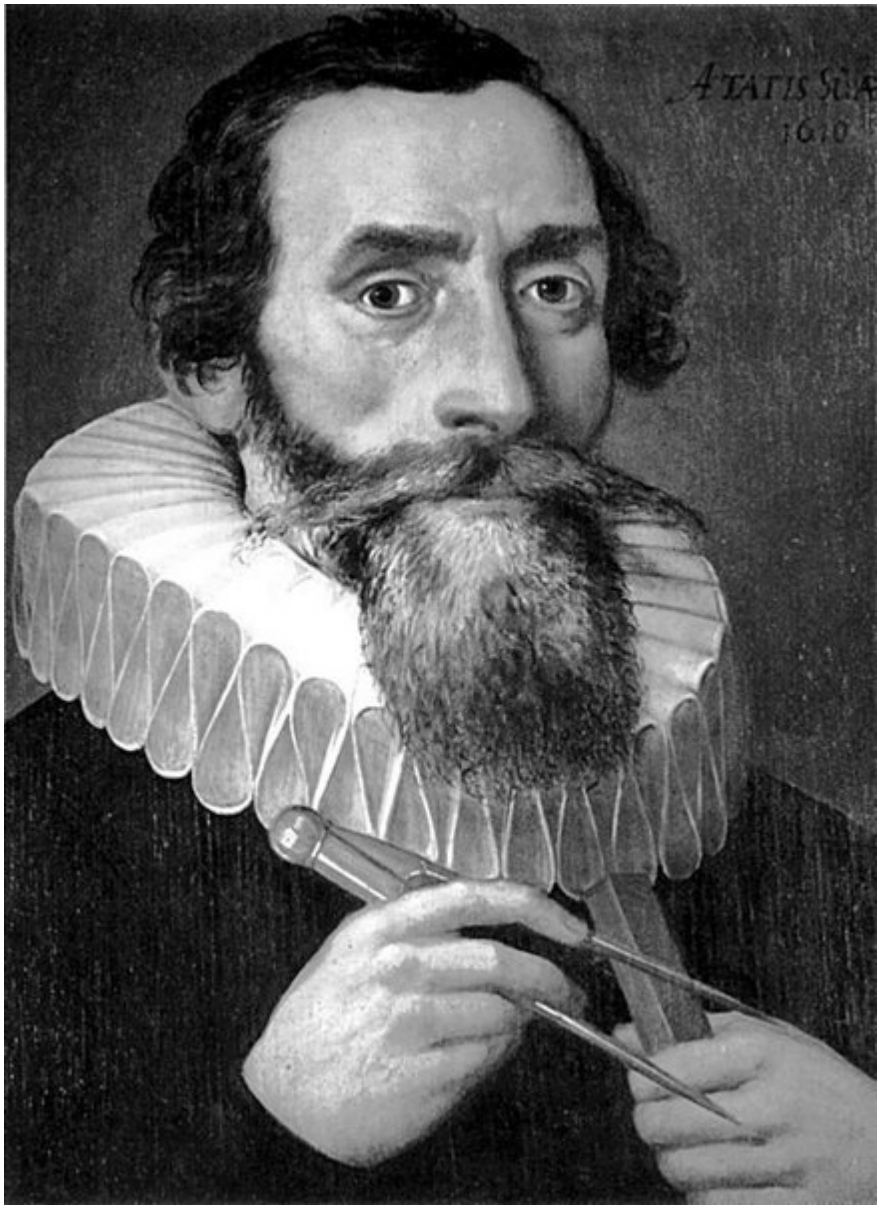


Есть миф, что Коперник избавился от эпициклов в гелиоцентрической системе мира. Есть миф, что телескоп изобрел Галилео Галилей. При этом забывается долгая история, предшествующая этим событиям. Нам легче осознавать историю, если разбить ее на некие периоды, выделить в ней поворотные моменты, которые словно возникли из ниоткуда. К сожалению, это неправильный взгляд на реальный исторический процесс. История культуры, и науки в частности, больше похожа на паутину, чем на прямую дорогу из желтого кирпича.

Но так как мы занимаемся не историей науки, давайте все же упростим наш рассказ и остановимся на трех ученых из бесчисленного ряда астрономов XVI–XVII веков, которым мы обязаны окончательным утверждением гелиоцентризма: это Тихо

Браге (1546–1601), Галилео Галилей (1564–1642) и Иоганн Кеплер (1571–1630). Научный мир в те времена был весьма замкнутым, все более или менее крупные ученые знали друг друга. Жизни и научные достижения Браге, Кеплера и Галилея так переплелись, что невозможно рассказать об одном, не рассказав о двух других. Браге прославился высокоточными наблюдениями, на основании которых Кеплер вывел знаменитые три закона движения планет, и именно благодаря наблюдениям в телескоп Галилея гелиоцентрическая картина мира стала общепризнанной.

Кеплер родился в городке Вайль-дер-Штадт на юге Германии. Его увлечение астрономией началось еще в детские годы. В своих воспоминаниях он описал два ярких эпизода из детства: как он вместе с матерью с холма наблюдал комету в ночном небе и как чуть позже, тоже с матерью, – лунное затмение. Всю свою жизнь Кеплер испытывал трепетную любовь к матери, она играла в его жизни одну из главных ролей. Пройдет много лет, и ее обвинят в колдовстве и посадят в тюрьму. Кеплер, не видя иной возможности спасти мать, сам выступит ее адвокатом. Благодаря его уму, таланту и выдержке он добьется успеха и она избежит костра. Но выйдя из тюрьмы уже совсем старой и больной женщиной (ей было тогда 74), она не проживет и года.



Иоганн Кеплер

Судьба сыграла с Кеплером злую шутку. В шестилетнем возрасте он заболел оспой. К счастью, он выжил, однако болезнь сказалась на зрении. Сильная близорукость и монокулярная полиопия (или множественное зрение, при котором одиночный предмет воспринимается как несколько) остались с ним навсегда. Тем не менее это не помешало ему стать великим астрономом.

В 1591 году Кеплер поступил в университет в Тюбингене, где смог учиться благодаря стипендии, назначенной ему за успешное

обучение в школе. В университете на Кеплера оказал большое влияние Михаэль Местлин, астроном и один из первых последователей Коперника. Вслед за учителем Кеплер становится сторонником гелиоцентризма.

После окончания университета, будучи с детства крайне набожным, он должен был стать священнослужителем. Но преподаватели вовремя заметили выдающиеся способности юноши, и его планам не суждено было сбыться. В год окончания университета Кеплера приглашают в Грац на должность математика в протестантской школе.

Мироощущение Кеплера с самого молодого возраста было бурлящей смесью религиозности, любви к астрономии и приверженности к неоплатонизму. Отправной точкой его рассуждений стало убеждение в том, что Бог создал мир геометрически совершенным. В итоге Кеплер всю жизнь потратил на поиски высшей гармонии. Его религиозность была совсем не похожа на ту, о которой любят говорить в школах, обвиняя в невежестве Средневековье, – она представляла собой скорее духовное путешествие. И именно мистическое мироощущение сподвигло его на занятия астрономией – наукой, претендующей на способность объяснить устройство небес. Кеплер задавался вопросами, которые в прошлые столетия старались обходить стороной: почему орбиты планет именно такие, какие есть, а не иные? почему планет именно шесть (столько было известно в его время), а не больше или меньше? Ответы на эти вопросы означали для него разгадку замысла самого Бога. И в конце концов путь Кеплера привел его к тому, что он был не понят и отвергнут даже братьями по протестантской вере.

Следующее за окончанием университета лето 1595 года Кеплер проводит в поисках закономерностей размеров орбит известных светил. После тщательных раздумий и бесчисленных попыток связать вселенскую гармонию с геометрией ему в голову приходит прекрасная идея о том, что между размерами орбит и пятью платоновыми многогранниками[20] есть связь: «Орбита Земли есть мера всех орбит. Вокруг нее опишем додекаэдр. Описанная вокруг додекаэдра сфера есть сфера Марса. Вокруг сферы Марса опишем тетраэдр. Описанная вокруг тетраэдра сфера есть сфера Юпитера. Вокруг сферы Юпитера опишем куб. Описанная вокруг куба сфера есть сфера Сатурна. В сферу Земли вложим икосаэдр. Вписанная в него сфера есть сфера Венеры. В сферу Венеры вложим октаэдр. Вписанная в него сфера есть сфера Меркурия»[23]. Для наглядности он даже поместил Солнце в центр мира, что означало возвращение отвергнутых Коперником эквантов. Но это пустяки по сравнению с тем, что его система

отвечала на вопрос, почему орбиты планет имеют именно такой радиус, а не другой, и почему планет именно шесть.

Кеплер снова и снова, дни и ночи напролет тщательно проверяет свои расчеты. Почти все сходится, а остальное он списывает на неточности измерений. Он вдохновлен и счастлив. В 1596 году Кеплер публикует книгу, где повествует о своих открытиях. Она называется «Тайна мироздания».

Вот что писал Кеплер о своей первой книге спустя много лет: «Словно оракул с небес продиктовал мне главы этой книжки, так все они, по общему признанию, были превосходны и отвечали истине… Мне самому, в течение вот уже 25 лет работающему над преобразованием астрономии (начатым знаменитым благородным датским астрономом Тихо Браге), главы этой книжки не раз освещали путь. Почти все астрономические труды, которые я опубликовал за это время, берут свое начало в той или иной главе моей первой работы и поэтому могут рассматриваться как более подробное или более полное изложение этих глав»[24].

«Тайна мироздания» пользовалась большим успехом, породив как волны восторгов, так и потоки критики. Во втором издании Кеплер совершенствует свою систему, исправляет некоторые ошибки, допущенные в первом издании, и точнее подгоняет теорию под наблюдения.

В 1596 году один из экземпляров своей книги Кеплер посылает Галилео Галилею, другой – тогда уже знаменитому астроному Тихо Браге. Галилей в ответном письме похвалил этот труд, хотя, по-видимому, читал его не очень внимательно. Также он написал, что на руках у него есть доказательства истинности

гелиоцентризма, но он не решается их публиковать, ибо запуган судьбой Коперника, осмеянного и отверженного (и не зря: через четыре года на костре святой инквизиции будет сожжен ярый последователь Коперника Джордано Бруно, вклад в астрономию которого сомнителен, а многие мировоззренческие утверждения и вовсе абсурдны, но все же этого явно не достаточно, чтобы поплатиться жизнью).

В отличие от Галилея, Браге в ответном письме Кеплеру выразил сожаление о потраченном молодым человеком времени на бесплодное следование системе Коперника. Возможно, тут сказался тот факт, что Браге создал свой вариант системы мироустройства. (Недовольство системой Птолемея было повсеместным. Почти каждый уважающий себя астроном создал в те годы свою модель мира.) Согласно этой системе все планеты вращаются вокруг Солнца, но само Солнце вращается вокруг Земли, находящейся в состоянии покоя. И все же, несмотря на научные разногласия, Браге высоко оценил математические способности Кеплера и, отчаянно нуждаясь в талантливом помощнике, предложил ему сотрудничество. Он звал его дважды. В первый раз Кеплер отказался, но во второй согласился, потребовав жалование, достаточное для переезда и обеспечения семьи. В это время в Граце начались гонения на протестантов, и церковь поставила Кеплеру ультиматум: или он примет католическую доктрину, или его ждет изгнание из города. Таким образом, предложение Браге оказалось весьма кстати, и в 1600 году ученые начали совместную работу в Праге.

Тихо Браге родился через три года после смерти Коперника. Известность он получил благодаря книге, в которой смог убедительно доказать, что вспышка, осветившая небо в 1572 году, – всего лишь звезда, а не комета или какое-либо божественное знамение. Это была первая за более чем полтысячи лет сверхновая, взорвавшаяся в нашей галактике. Следующая вспышка произойдет через 32 года, в 1604 году, – позже ее назвали сверхновой Кеплера. Именно сверхновая 1572 года вдохновила Браге возобновить занятия астрономией, от которой он отошел, увлекшись алхимическими опытами. И вскоре его авторитет среди астрономов вырос настолько, что в 1574 году датский король пригласил Браге читать лекции в Копенгагенском университете, а через два года специальным указом пожаловал ему в пожизненное пользование остров Вен. На этом острове Браге построил первую в Европе обсерваторию[21], которую назвал «Ураниборг», что значит «Небесный замок». Браге был деспотичным хозяином острова: слуги и рабочие часто страдали от жестоких наказаний за свои провинности, а сотрудники и

ученики – за ошибки в расчетах. Но жизнь в обсерватории была довольно комфортной. Там, помимо помещений, из которых велись астрономические наблюдения, располагались библиотека, столовая, комнаты для ученого и членов его семьи, гостей, сотрудников и учеников, жилые помещения для рабочих и прислуги. А еще в Ураниборге имелся водопровод. Этого чуда техники в то время не было даже у самого короля.

По прошествии чуть более 20 лет датский король умер и финансирование обсерватории прекратилось. Браге был вынужден искать себе нового покровителя, которым в итоге стал Рудольф II, в те времена император Священной Римской империи. Его резиденция находилась не в столице империи – Вене, а в Праге. Потомок Габсбургов, Рудольф II стал одним из символов столицы Богемии. Как правитель он уделял политике и войне меньше внимания, чем коллекционированию произведений искусств, изучению алхимии и астрономии. Собирая в своем дворце картины, скульптуры, научные приборы и тратя на них головокружительные по тем временам средства, он стремился сделать Прагу культурной столицей мира. При его дворе находили теплое местечко лучшие ученые. Хорошо разбираясь во многих искусствах и науках, но все же являясь любителем, он старался окружить себя настоящими профессионалами своего дела. Великолепную картину торжества разума и эстетики омрачал лишь тот факт, что в XVI веке не видели большой разницы между астрологическим знанием и астрономическим, между алхимией и естествознанием. Толпы авантюристов и откровенных шарлатанов стекались в Прагу и неплохо там обосновывались. Однако же съезжались сюда и талантливые художники, скульпторы, механики, конструкторы и астрономы. В 1598 году в Прагу прибыл и приглашенный Рудольфом II Тихо Браге.

Всю свою жизнь Браге вел астрономические наблюдения. Инструменты, созданные по его чертежам, и усовершенствованные методы наблюдений давали поразительную, недостижимую до этого точность. (Еще более точные наблюдения буду проведены только через полтора столетия, когда Гершель построит свои великолепные телескопы. Среди инструментов Браге же телескопов не было.) Накопленные наблюдения, конечно же, подлежали анализу. И именно для этого Браге был нужен Кеплер. В 1601 году они начали работу над астрономическими таблицами, названными в честь императора Рудольфовыми. Но Браге не успел завершить начатый труд: он скоропостижно скончался в этом же году. Последние его слова были: «Надеюсь, жизнь прожита не зря». Кеплер занял его

должность при дворе, получил в свое распоряжение все данные наблюдений и астрономические инструменты. Единственным условием стало продолжение работы над Рудольфовыми таблицами, которую Кеплер завершил лишь через 26 лет, попутно открыв законы движения небесных тел. Значение этих таблиц было настолько велико, что еще не одно столетие ими пользовались мореплаватели и астрономы.

В октябре 1604 года в созвездии Змееносца зажглась новая звезда – примерно в 20 000 св. лет от Солнца взорвалась сверхновая (мы называем ее *SN* 1604). Кеплер не сразу, а лишь через неделю приступил к наблюдениям за ней, которые продолжались в течение всего года. Результаты этих наблюдений он изложил в книге «О новой звезде в ноге Змееносца», изданной в 1606 году в Праге. В историю эта звезда вошла как «сверхновая Кеплера».

Работая над Рудольфовыми таблицами, Кеплер, используя только результаты наблюдений, открыл три закона движения планет. Первый закон описывает геометрию орбит планет и формулируется так: каждая планета Солнечной системы движется по эллипсу, причем Солнце располагается в одном из фокусов этого эллипса. Если по каким-то причинам вы не помните, что такое эллипс или фокус эллипса, то представьте себе следующую картинку: в дощечку на некотором расстоянии друг от друга вбиты два гвоздика, соединенные ниткой, причем длина нитки больше расстояния между гвоздиками. Если карандашом зацепить нитку и обвести им гвоздики, держа нитку в постоянном натяжении, то очерченная фигура окажется эллипсом, а два гвоздика станут его фокусами. Сумма расстояний от фокусов до любой точки эллипса, таким образом, есть величина постоянная. Не сложно заметить, что окружность – это частный случай эллипса, когда фокусы находятся в одной точке.

Двигаясь по эллиптической орбите, планета находится то ближе к Солнцу, то дальше от него. Также меняется ее скорость – чем больше расстояние между планетой и Солнцем, тем меньше скорость орбитального движения планеты. Второй закон Кеплера гласит: каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причем радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, за равные промежутки времени «заметает» равные площади (см. рис. 8).

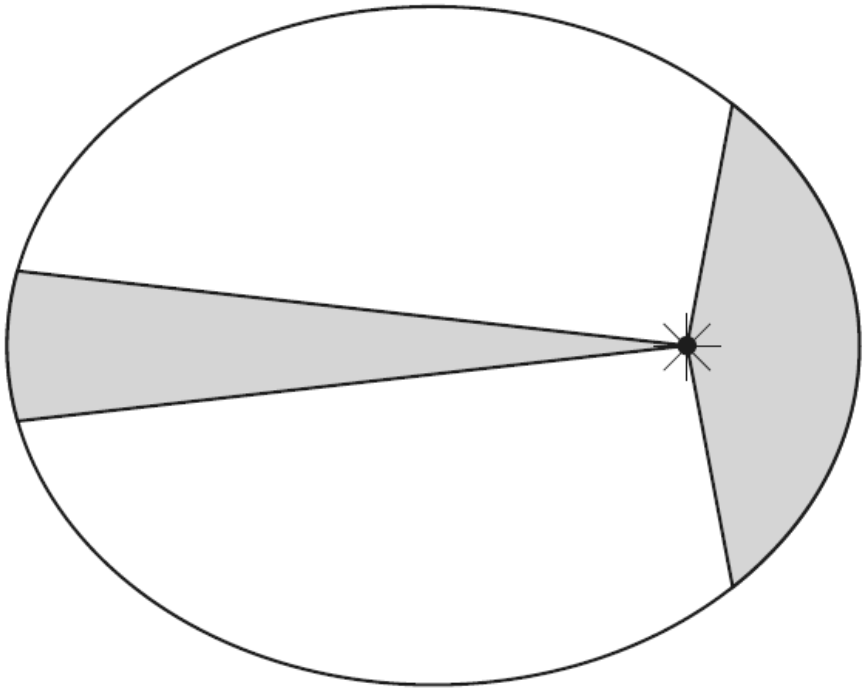


Рисунок 8. Эллиптическая орбита планеты. Закрашены равные площади, «заметаемые» радиус-вектором за равные промежутки времени

Третий закон Кеплера связывает геометрические характеристики орбит с характеристиками движения. Звучит он так: квадраты периодов обращения планет (T) вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит планет (a):

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Конечно, выводы Кеплера распространялись только на Солнечную систему. Действительно, утверждать, что вокруг других звезд могут обращаться планеты и что законы, которым они подчиняются, совпадают с законами, действующими в нашей системе, было смертельно опасно: в воздухе еще пахло костром, на котором недавно сгорел Бруно. Кеплер не раз говорил о законе тяготения, который управляет движением планет. Но выразить этот закон в математической форме ему не удалось. Только к

концу века Ньютон докажет, что особенности движения планет, сформулированные Кеплером, могут быть выведены из закона всеобщего тяготения.

Первые два закона Кеплер вывел на основании данных о движении Марса, доставшихся ему от Тихо Браге. Не располагая достаточным математическим аппаратом, Кеплер скрупулезно пытался найти кривую, правильным образом описывающую орбиты планет. В конце концов он полностью отказался от эпициклов и эксцентриков и пришел к выводу, что Марс движется по эллиптической орбите. Эти два закона Кеплера впервые были опубликованы в книге «Новая астрономия»[22] в 1609 году. Позже он доказал, что все известные ему планеты подчиняются этим законам. В 1612 году император Рудольф II умер, и Кеплер покинул Прагу. Он перебрался в город Линц, в котором жил до самой смерти. Третий закон был опубликован Кеплером в 1619 году в книге «Гармония мира».

До конца жизни Кеплер не отрекся от своих юношеских представлений о Боге-геометре, и в последних сочинениях он вновь обращается к теме многогранников и делает ряд открытий. В книге «Гармония мира» он описывает свое представление об устройстве мира. Кеплер считал, что Земля имеет душу, и эта душа может чувствовать души других планет. Ученый посвятил много страниц описанию музыки, которую издают планеты, обращаясь по орбитам вокруг Солнца. По его представлениям, каждой планете соответствует своя нота, и чем дальше от Солнца находится планета, тем более низко эта нота звучит. Хотя Кеплер сетовал на то, что, скорее всего, красивой музыки планеты не рождают, он считал, что, возможно, в самом начале времен Бог наслаждался прекрасной симфонией.

Сегодня подобные идеи кажутся нам смешными, наивными и абсурдными. Но в оправдание можно сказать, что Кеплер жил в эпоху, когда научное мировоззрение только вставало на ноги, будучи пока лишь слабой альтернативой мистическому и религиозному взгляду на мир. Еще не было уверенности в существовании неких общих для всех явлений природы законов. И как минимум поэтому нужно отдать должное мужеству Кеплера.

Как я уже упоминал, молодой Кеплер отправил один экземпляр своей книги «Тайны мироздания» Галилео Галилею. Более серьезного научного авторитета в те времена не существовало. Один из покровителей Галилея писал о нем: «Земля не знала такого гения со времен Аристотеля». Научные достижения Галилея огромны, и даже скромное упоминание о каждом из них займет много страниц.

Галилей родился в 1564 году. Его отцом был видный в то время теоретик музыки Винченцо Галилей, прославившийся тем, что разработал и провел эксперимент, демонстрировавший связь между натяжением струн и создаваемыми ими тонами. Эксперименты Винченцо Галилея можно считать отправной точкой современной акустики, которая началась как приложение к теории музыки, а затем превратилась в самостоятельный раздел физики. Именно от своего отца Галилей перенял максиму «эксперимент – учитель всего»[25].

Поступив в Пизанский университет и проучившись там четыре года, Галилей больше не мог оплачивать свое обучение из-за финансовых проблем и вернулся во Флоренцию без степени. Однако его первая научная работа «Маленькие гидростатические весы», написанная в 1586 году, способствовала его знакомству с маркизом Гвидобальдо дель Монте, ставшим ему другом и покровителем. Тремя годами позже тот помог Галилею получить кафедру математики в том же Пизанском университете, который он так и не окончил. Дель Монте также познакомил Галилея с его будущим покровителем, герцогом Фердинандо I Медичи. В 1592 году Галилею предложили должность в Университете Падуи, и он перебрался преподавать (в том числе и птолемееву астрономию) туда. Годы пребывания в этом университете стали самыми плодотворными для Галилея. Тогда же произошло заочное знакомство Кеплера и Галилея.

Область научных интересов Галилея была обширной, но именно после взрыва сверхновой 1604 года он начал более активно заниматься астрономией. Долгое время он не относился всерьез к кеплеровским моделям орбит планет. А увидевшую свет в 1609 году «Новую астрономию» даже не читал и наотрез отказывался верить в эллиптические орбиты.

В это время в астрономии тихо совершилась еще одна революция: в голландском городе Мидделбург то ли производитель очков Ганс Липперсгей, то ли его коллега Захарий Янсен (сейчас уже неизвестно, кто из них на самом деле был первым) изобрел некое оптическое устройство, которое увеличивало далекие предметы. В 1609 году Галилей, услышав о создании «голландских очков для перспективы», но не имея возможности увидеть их, сам конструирует за несколько дней такое же устройство с 20-кратным увеличением (в будущем такие устройства назовут телескопами). С его помощью Галилей и начал изучать небо.

Впервые в истории человек смог увидеть в ночном небе больше, чем ему было дано природой. В 1610 году в книге «Звездный вестник» Галилей публикует описания того, что ему

открылось. Книга расходится мгновенно, вся образованная Европа зачитывается ею, а Галилей становится самым знаменитым ученым Европы.

Открытия Галилея оказываются действительно изумительными. Благодаря телескопу он определяет, что Луна имеет несферическую форму и разнообразный рельеф, схожий с земным, а также, и это самое удивительное, что светит она не своим, а отраженным солнечным светом. Галилей исследует пятна на Солнце, доказывает, что оно вращается, а еще открывает четыре спутника Юпитера (это Ио, Европа, Ганимед и Каллисто). Кроме того, Галилей обнаруживает фазы Венеры. Это означает, что она вращается вокруг Солнца и ее свет не собственный, а отраженный солнечный.

Все это говорит о том, что мир небес подвержен изменениям со временем, он не идеален и не статичен, а значит, между нашим подлунным миром и космосом нет разницы: и тот и другой состоят из одной и той же материи и управляются одними и теми же законами. Открытия Галилея окончательно разрушили господствовавшую астрономическую парадигму, оставшуюся со времен античности.

Став значимой фигурой, Галилей открыто начинает поддерживать Коперника, от его былой робости и страха не остается и следа. И все же, к сожалению, у Галилея на руках не было неоспоримых доказательств истинности гелиоцентризма. Более того, факты указывали на то, что Земля неподвижна.

Например, неминуемым следствием гелиоцентризма является годичный звездный параллакс – изменение в течение года взаимного положения звезд, обусловленное тем, что наблюдатель вместе с Землей двигается вокруг Солнца и смотрит на небо из разных точек земной орбиты. Чем дальше находится звезда, тем меньше будет ее параллакс. Но его сложно определить. Звездный свет, видимый с Земли, подвержен влиянию сезонных колебаний температуры и влажности воздуха, к тому же картинку смазывает дрожание атмосферы. Все это мешает провести высокоточные наблюдения.

Однако Галилей придумал и популяризовал способ обойти эти трудности. Все, что нужно было сделать – наблюдать оптические двойные звезды, то есть звезды, расположенные на большом расстоянии друг от друга (важно, чтобы одна звезда находилась от наблюдателя намного дальше, чем другая), но при этом лежащие практически на одной прямой для наблюдателя на Земле. В течение года параллакс далекой звезды в рассматриваемой двойной системе практически нулевой, а вот параллакс близкой более значительный. Но самое главное, свет,

приходящий к нам от этих звезд, подвержен одинаковым атмосферным и приборным искажениям, а значит, их взаимное смещение может быть обнаружено. Галилей наблюдал параллакс оптической двойной системы звезд Мицар и Алькор в созвездии Большой Медведицы в 1617 году. Однако смещения звезд друг относительно друга он не обнаружил, что, в принципе, не удивительно, если учесть, какими примитивными телескопами располагал астроном. И все же неудача не поколебала его веры в гелиоцентризм.

Другим примером может служить теория приливов, которую разработал Галилей, основываясь на теории двух движений Земли – годичного и суточного вращений. Сегодня мы знаем, что приливы вызваны взаимодействием земных океанов с Луной, Галилей же ее влияние никак не учитывал. Его теория давала проверяемое предсказание – один прилив в день. Однако все жители Италии знали, что приливов в сутках два, утром и вечером. И все же Галилей был уверен в своей правоте, считая, что второй прилив вызывают какие-то вторичные эффекты.

Итак, гелиоцентризм во времена Галилея еще не выдерживал критики. Но страсти вокруг него не утихали. Необходимо было официальное мнение церкви. В 1616 году папа Павел V поставил свою подпись под заключением теологической комиссии по вопросу гелиоцентризма: «Утверждать, что Солнце стоит неподвижно в центре мира – мнение нелепое, ложное с философской точки зрения и формально еретическое, так как оно прямо противоречит Святому Писанию. Утверждать, что Земля не находится в центре мира, что она не остается неподвижной и обладает даже суточным вращением, есть мнение столь же нелепое, ложное с философской и греховное с религиозной точки зрения»[26].

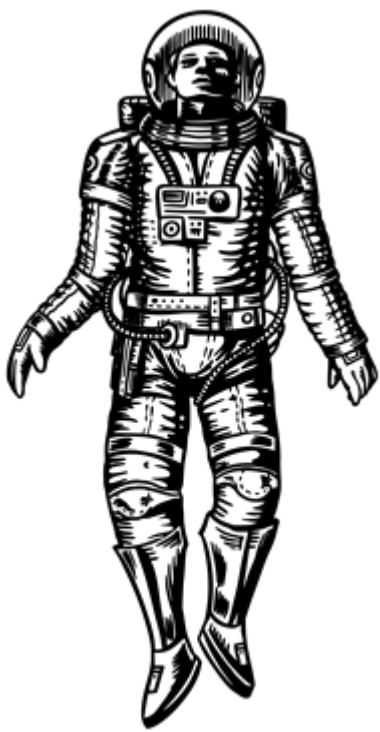
Через семь лет, в 1623 году, папский престол занял Урбан VIII. Комиссия, назначенная папой для оценки гелиоцентризма, рассмотрев все доказательства движения Земли, указала на то, что наблюдаемые высокие и низкие приливы, фазы Венеры, солнечные пятна и спутники Юпитера все же могут быть согласованы с теорией стационарной Земли.

В 1630 году Галилей закончил писать главный труд своей жизни «Диалог о двух главнейших системах мира». По форме он представляет собой разговор двух философов, придерживающихся разных взглядов на устройство мира, и обывателя, изначально не разделяющего ни одну из точек зрения. Для того чтобы книга прошла цензуру церкви, Галилей написал в прологе, что цель ее в развенчании идей Коперника. Однако после прочтения книги любому читателю становилось

совершенно очевидно, каких взглядов придерживается автор и какую мысль он хочет донести на самом деле. Шалость удалась, и в 1632 году книгу опубликовали. Через несколько месяцев церковь спохватилась (видимо, заинтересованные лица все же вдумчиво прочитали книгу), и Галилея вызвали в Рим, где его ждало судебное разбирательство.

После процесса, длившегося четыре месяца, семидесятилетний Галилей под угрозой костра отрекся от гелиоцентризма, его заключили под домашний арест на одной из вилл Медичи. Там он провел остаток жизни, работая над книгой «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки», которая так и осталась незаконченной. 8 января 1642 года Галилео Галилей ушел из жизни.

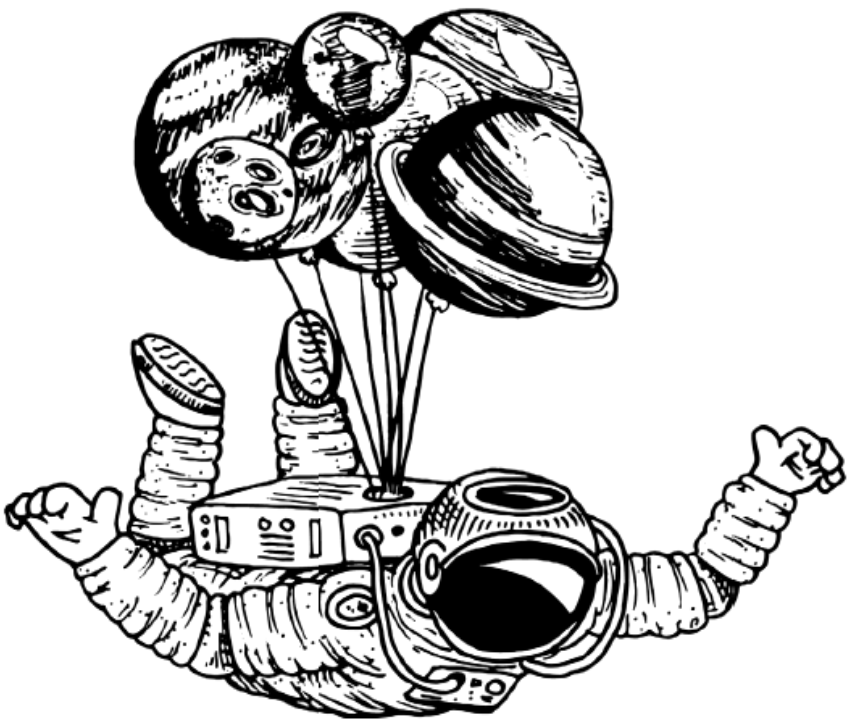
Законы Кеплера еще долго, вплоть до работ Исаака Ньютона, не имели математических доказательств, параллакс был достоверно обнаружен только в XIX веке, тогда же была построена правильная теория приливов.



Глава 4. Телескопы и люди

По случаю конфирмации я не получил ни часов, ни первую пару длинных штанов, как большинство лютеранских мальчиков. Я получил телескоп. Моя мама думала, что он будет лучшим подарком.

ВЕРНЕР ФОН БРАУН



До недавнего времени о существовании планет вокруг других звезд астрономы могли лишь строить гипотезы. Конечно, все понимали, что наша Вселенная была бы очень странным местом, если бы планеты вращались только вокруг Солнца, однако разглядеть планеты у других звезд казалось невозможным. Сейчас мы знаем, что большинство звезд в нашей галактике имеют планетные системы. Чаще всего говорят о существовании от одной до десяти планет около каждой звезды. Более точные оценки привести сложно – нужно больше данных наблюдений. Если волевым решением выбрать из этого диапазона цифру 3, мы

получим триллион планет только в нашей галактике. А значит, просто чтобы их пересчитать (тратя на каждую планету по одной секунде), вам понадобится 30 000 лет!

Все знания о звездах, планетах, галактиках и Вселенной астрономы получили в ходе наблюдений за небом[23]. Таким образом, основным рабочим инструментом астронома является телескоп – он собирает излучение, приходящее к нам из космоса, и делает его доступным для анализа.

Первые телескопы работали в оптическом диапазоне. В середине XIX века Джеймс Клерк Максвелл показал, что видимый свет является лишь одним из видов электромагнитного излучения, очень узкой полоской в широком спектре электромагнитных волн, на одном конце которого расположилось ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение, а на другом – инфракрасное и радиоизлучение. Сегодня астрономы с помощью телескопов разных видов изучают небо во всех диапазонах волн. Например, чтобы изучать звезды, лучше всего подходит видимый спектр, а газопылевые и молекулярные облака хорошо видны в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн.

В Чилийской высокогорной пустыне на плато Чахнантор, там, где воздух сух и неподвижен бóльшую часть года, вдали от крупных городов, на высоте 5 км над уровнем моря расположен один из самых знаменитых, самых дорогих и мощных радиотелескопов в мире – *Atacama Large Millimeter Array* («Атакамская большая антенная решетка миллиметрового диапазона»), или *ALMA*. Этот телескоп не похож на привычные для нас телескопы, а напоминает скорее разбросанные по пустыне в хаотичном порядке гигантские спутниковые тарелки. Но на самом деле эти тарелки представляют собой единый телескоп, позволяющий с очень высокой точностью получать координаты космических объектов.

Дело в том, что телескопы – это штуки, в случае с которыми размер действительно имеет значение. Разрешающая способность в них зависит от диаметра главного зеркала (или приемной тарелки): чем она больше, тем более близкие объекты он сможет «разрешить» – разделить, идентифицировать как два объекта, а не принять за один источник. Для того чтобы получить более четкие изображения, мы должны делать более крупные телескопы. Но кто решится сделать телескоп с диаметром тарелки пусть даже в 10 км?

После Второй мировой войны для увеличения разрешающей способности приборов, регистрирующих электромагнитное излучение, английский радиоастроном Мартин Райл разработал

новую технологию, прилучившую название «радиоинтерферометрия». Она позволила объединять несколько радиотелескопов таким образом, чтобы те работали как один огромный телескоп – радиоинтерферометр. В радиоинтерферометре разрешающая способность зависит не от размера зеркала, а от расстояния между радиотелескопами, входящими в единый комплекс (это расстояние называют базой).

Идея здесь довольно простая, но иллюстрировать ее лучше на примере двух радиотелескопов. Представьте себе звезду, которую мы наблюдаем, и две отдельно стоящие тарелки радиотелескопов, объединенных в радиоинтерферометр. Поскольку телескопы находятся на некотором расстоянии друг от друга, сигнал от звезды приходит на каждый из них в разное время. В процессе суточного перемещения звезды по небосводу время прихода сигналов на радиотелескопы меняется. Все сигналы передаются на коррелятор (центральный компьютер) и там специальным образом обрабатываются. Такая схема позволяет точно определить координаты небесного объекта, и чем больше радиотелескопов объединено в радиоинтерферометр, тем выше его разрешающая способность.

Радиоинтерферометрия позволила создавать радиотелескопы с базой, эквивалентной радиотелескопу с многокилометровой тарелкой. На 2020 год *ALMA* является самым крупным по числу объединенных в нем радиотелескопов радиоинтерферометром: в его составе 66 12-метровых тарелок, каждая из которых способна к тому же произвольно перемещаться по площадке размером в 16 км. Все это позволяет получить поистине поразительное разрешение. Благодаря *ALMA* астрономы сделали много важных открытий. В свете нашего разговора об экзопланетах упомяну одно из них: в 2014 году были опубликованы великолепные фотографии протопланетного диска звезды *HL* Тельца[27]. Это первые фотографии, на которых можно детально рассмотреть структуру газопылевого диска.

В 2021 году планируется начать строительство крупнейшего из когда-либо созданных радиоинтерферометров. По структуре он будет напоминать *ALMA*. Его антенны разместят на двух материках: в Африке, на территории ЮАР, и в Австралии. В ЮАР расположат 200 радиотарелок, способных принимать сигналы в среднечастотном диапазоне, а в западноавстралийской пустыне – почти 130 000 низкочастотных антенн. Проект носит название *Square Kilometre Array* («Антенная решетка площадью в квадратный километр»), или *SKA*[24]. Первоначально общая эффективная площадь радиотелескопа, как ожидается, составит 1 км^2 (а может, и больше – до 3 км^2). Количество данных, генерируемых этим

радиотелескопом в секунду, в 10 раз превысит глобальный интернет-трафик. Если все пройдет как задумано, в середине 2020-х годов начнутся первые наблюдения.

При максимальном расстоянии в 65 км между антеннами в Австралии и 150 км в ЮАР, вдали от городов и радиопомех *SKA* сможет улавливать радиосигналы, которые испускают космические объекты, в том числе протопланетные облака, удаленные от нас на десятки тысяч световых лет, с беспрецедентной чувствительностью.

Для поиска уже сформировавшихся планет радиоинтерферометры подходят плохо[25]. Экзопланеты обычно ищут в инфракрасном и оптическом диапазонах – различные методы поиска эффективны в разных диапазонах волн. Больше всего экзопланет обнаружено в оптическом диапазоне. Но для наблюдений «в оптике» подходит не любая точка на Земле. На самом деле существуют строжайшие требования, которым должна удовлетворять местность, чтобы строительство современного телескопа там было целесообразным. Как и радиоинтерферометрам, оптическим телескопам необходимо отсутствие крупных городов рядом, ясное небо, спокойный воздух и сухой климат. На нашей планете не так много мест, которые могут обеспечить эти условия на протяжении большей части года. Но если подходящее место найдено, будьте уверены: здесь вы найдете не один и не два, а целое множество телескопов разных стран. Такими цитаделями астрономии являются, например, пустыня Атакама в Чили, вулкан Роке-де-лос-Мучачос на Канарском острове Пальма, гора Мауна-Кеа на Гавайях. Последнее место теперь все чаще упоминают в СМИ из-за проблем религиозного характера: вулкан, на котором собираются строить телескоп, является священным местом для коренного народа Гавайев[28]. Сейчас там расположена обсерватория Кека.

Существует много способов войти в историю, и большое количество денег этому только способствует. Однако распространенное мнение гласит, что состоятельные люди не очень-то хотят, чтобы их знали. Если же вы по счастливой случайности не принадлежите к такой породе людей, профинансируйте строительство телескопа и можете быть уверены: его назовут в вашу честь. В 1954 году Уильям Майрон Кек создал фонд для поддержки научных открытий и новых технологий. А в 1980-х годах в стенах Калифорнийского университета родилась идея создать самый мощный и крупный (на тот момент, конечно же) телескоп в мире. Поиски финансирования привели астрономов Калифорнийского университета в фонд Кека, основатель которого и стал

учредителем всего проекта, вложив 70 миллионов долларов. Благодарные ученые назвали телескоп его именем.

Обсерватория Кека состоит из двух 10-метровых оптических телескопов: «Кек I» и «Кек II». «Кек I» увидел «первый свет»[26] в мае 1993 года, а «Кек II» – в октябре 1996-го. Так как технологии создания подходящих по качеству зеркал диаметром более 8,5 м не существует, главные зеркала этих телескопов состоят из 36 шестиугольных сегментов, действующих как единое целое.

Когда мы смотрим на звезды, мы видим свет, который прошел десятки и сотни триллионов километров в безвоздушном пространстве. Из-за таких больших расстояний звезды даже в мощные телескопы должны казаться нам точечными источниками без любого намека на наличие у них площади. Но последнюю сотню километров луч света проходит сквозь атмосферу Земли и преломляется в ее слоях подобно тому, как он преломлялся бы в призме. Эти слои образуются вследствие возникновения участков локальной турбулентности, хаотично меняющих температуру и плотность воздуха в атмосфере Земли. Из-за этого меняется и показатель преломления, и вместо точечного источника мы видим мерцающее пятно.

В 1999 году в обсерватории Кека была установлена система адаптивной оптики для корректировки искажений, вносимых турбулентностью атмосферы, в реальном времени. Принцип работы такой системы следующий: свет от звезды проходит через главное оптическое зеркало телескопа и попадает на так называемый датчик волнового фронта, измеряющий искажения изображения звезды. Далее компьютер вычисляет форму, которую нужно придать специальному деформируемому зеркалу, чтобы свести искажения света к минимуму. Адаптивное зеркало деформируется в соответствии с инструкциями компьютера, и в итоге можно получить изображения звезды, сравнимые с теми, что передают на Землю космические телескопы.

Для того чтобы система в каждый момент времени знала, как именно свет звезды искажен атмосферой, нужен эталонный источник света. Таким источником может быть звезда, характеристики излучения которой хорошо известны. Первые системы адаптивной оптики работали именно так. Но этот способ подходит не всегда. Например, может случиться, что звезда, достаточно близко расположенная к изучаемому объекту, просто не найдется. Выход из положения состоит в том, чтобы создать своего рода искусственную звезду. Как это делается?

На высоте 90 км над поверхностью Земли расположен слой атомов натрия, образовывающихся, вероятно, при распаде микрометеоров. Если эти атомы облучать лазерным лучом с

правильно подобранной частотой, они переходят в возбужденное состояние и сами начинают светиться – на небе зажигается «звезда». Такие натриевые звезды и используют в качестве эталонных. Главное преимущество этих звезд в том, что их можно зажечь в любой точке небесной сферы.

В 2001 году телескопы «Кек I» и «Кек II» были связаны в интерферометрическую систему с разрешающей способностью, эквивалентной разрешающей способности 85-метрового зеркала. Основной целью *NASA* на тот момент было изучение характеристик газопылевых дисков вокруг близких к Солнцу звезд. Это исследование должно было помочь глубже понять процессы, происходящие при формировании планет. Но ученые смогли сделать даже больше. С помощью интерферометра Кека и системы адаптивной оптики в 2012 году были произведены прямые наблюдения экзопланеты *LkCa* 15 *b*. Это самая молодая экзопланета из всех когда-либо обнаруженных – ей всего один миллион лет![29] Окруженная аккрецирующей пылью, она еще находится на стадии формирования. Именно это обстоятельство сделало ее доступной для наблюдений в инфракрасном диапазоне.

Хотя интерферометрическая система позволяет повысить разрешение телескопов, с чувствительностью, то есть тем, насколько слабоинтенсивные объекты способен обнаруживать телескоп, она, к сожалению, ничего сделать уже не может. Чувствительность зависит от фактического размера собирающего зеркала: чем оно больше – тем лучше. Поэтому технология интерферометрии не привела к исчезновению больших телескопов. На данный момент в мире строятся три гигантских телескопа: *Giant Magellan Telescope* («Гигантский Магелланов телескоп»), или *GMT*, и *Extremely Large Telescope* («Чрезвычайно большой телескоп»), или *ELT*, в Чили и *Thirty Meter Telescope* («Тридцатиметровый телескоп»), или *TMT*, на Гавайях в США. Размер их собирающих зеркал 25, почти 40 и 30 м соответственно! Такой размер зеркал вместе с системой адаптивной оптики позволит астрономам получать изображения, превосходящие по четкости даже те, что сделаны космическим телескопом «Хаббл» (а возможно, и телескопом «Джеймс Уэбб», который планируют запустить в космос в 2021 году).

Но революцию в поиске экзопланет произвели все же не наземные телескопы. Долгое время число обнаруженных экзопланет росло довольно медленно. История разделилась на до и после в момент запуска первого охотника за экзопланетами – космического телескопа «Кеплер» – 6 марта 2009 года. Не он открыл первую экзопланету, но именно он поставил на поток их

обнаружение и именно он превратил некогда сенсационные события в рутину. Однако, чтобы понять, почему «Кеплер» достиг таких успехов, нужно выяснить, в чем заключается сложность поиска экзопланет.

Достоверно о существовании экзопланет мы узнали только в самом конце XX столетия. Почему? Причиной тому несколько стоящих перед наблюдателем проблем. Первая и самая очевидная состоит в том, что мы пытаемся обнаружить относительно небольшие объекты, расположенные на гигантском расстоянии от нас.

Что обычно имеют в виду, когда говорят об этих «гигантских расстояниях»? Самым точным способом вычисления расстояния до звезды в пределах Галактики является тригонометрический метод: сначала определяется видимое смещение звезды на небе, произошедшее в течение полугода. Половина этого смещения, выраженная в градусах, называется годичным звездным параллаксом. Далее рассматривается прямоугольный треугольник, образованный звездой, Солнцем и Землей (расстояние от Земли до Солнца известно), и вычисляется искомое расстояние. Как вы помните, звездный параллакс двойной звезды первым пытался измерить Галилей[27], но у него ничего не вышло. Потом неоднократные попытки предпринимали и другие астрономы, в числе которых Роберт Гук, Жан Пикар, Оле Ремер, Уильям Гершель, но и они оказались безуспешными. Только к первой трети XIX века астрономические инструменты достигли точности, достаточной для измерения параллакса звезд.

Первым годичный параллакс вычислил Василий Яковлевич Струве. Его измерения были произведены для звезды Альтаир в 1821 году. В 1837 году он измерил параллакс Веги. Через год, вдохновившись результатами Струве, известный астроном и математик Фридрих Бессель с еще большей точностью вычислил годичный параллакс звезды 61 Лебедя. Этот результат затмил пионерскую работу Струве, и в 1842 году Лондонское королевское общество наградило Бесселя золотой медалью.

Однако Струве и Бессель сделали и кое-что еще более важное: они впервые продемонстрировали необъятные размеры Млечного Пути и Вселенной, определив истинные масштабы невероятных расстояний, отделяющих звездные системы друг от друга. Оказалось, что Вега отдалена от нас на 25 св. лет – это в полтора миллиона раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца. И все же проблема гигантских расстояний не единственная.

Вторая проблема еще более сложная. Каким образом можно обнаружить экзопланету? Кто-то ответит: нужно направить на нее телескоп, и мы увидим ее, подобно тому, как видим кратеры на

Луне или кольца Сатурна. К сожалению, этот способ в случае с экзопланетами не работает. Любая оптическая система, будь то телескоп или человеческий глаз, видит что-то, поскольку это что-то является источником света. Соответственно, чем ярче объект, тем лучше его видно. Планеты свет не излучают и могут быть заметны только благодаря отражению света родительской звезды, причем некоторая часть этого света поглощается поверхностью планеты (например, Юпитер, самая большая планета Солнечной системы, отражает лишь одну миллиардную долю падающего на него солнечного света). Поэтому для далеких наблюдателей планеты кажутся очень тусклыми.

И наконец, третью проблему решить труднее всего, и именно она является самой главной. Дело в том, что по сравнению с теми расстояниями, которые отделяют одну звезду от другой, планеты находятся к своим звездам очень близко. А это значит, что весьма непросто отделить тусклый свет планет от мощного блеска самих звезд. Звезда буквально засвечивает планету, скрывает ее от наблюдателя в своем ореоле.

Для того чтобы понять, что за явление помогает астрономам находить экзопланеты, нужно вспомнить школьный курс физики. Сила, с которой звезда притягивает планету, равна силе, с которой планета притягивает звезду. Ускорение, вызванное этой силой, обратно пропорционально массе небесного тела: у легкой планеты ускорение больше, а у тяжелой звезды меньше. Если планета вращается вокруг звезды по идеальной окружности, то у ускорения звезды меняется только знак, но не величина. Однако чаще всего орбиты планет не круговые, и во время движения последние то приближаются к своей звезде, то отдаляются от нее. Возникающее, уже ненулевое, периодически меняющееся ускорение заставляет звезду вращаться вокруг центра масс системы – некой точки равновесия, не совпадающей с центром звезды. Центр масс системы Плутон – Харон располагается в пространстве между этими телами на высоте почти 1 000 км над поверхностью Плутона, центр масс Солнца и Юпитера – на 48 000 км выше поверхности Солнца, а центр масс системы Земля – Луна находится внутри Земли на расстоянии 4 670 км от ее центра.

Таким образом, когда мы говорим, что планеты вращаются вокруг своей родительской звезды, мы немного лукавим. Более корректная формулировка: звезды и планеты вращаются относительно центра масс их систем. Следовательно, нам нужно искать не признаки движения планет, а, наблюдая за звездой, искать признаки ее движения.

Первым, кто заявил, что обнаружил звездные колебания, стал

Питер ван де Камп (1901–1995). В конце 1930-х годов он наблюдал звезду Барнарда (ближайшая к нам одиночная звезда примерно в 6 св. годах от Солнца). Анализируя тысячи фотографий, сделанных в течение 40 лет, он утверждал, что обнаружил явные колебания звезды, вызванные планетой. Согласно вычислениям ван де Кампа планета должна была иметь массу, сопоставимую с массой Юпитера. К сожалению, другие астрономы не смогли подтвердить эти результаты, и долгое время считалось (и считается до сих пор), что ван де Камп просто ошибся: чтобы увидеть звездные колебания, нужны приборы, которые в то время еще не изобрели, так что у ван де Кампа их быть не могло (немногие обсерватории могут похвастаться их наличием и сегодня). Сам же ван де Камп до конца жизни стоял на том, что его измерения верны и планета у звезды Барнарда (и, возможно, не одна) действительно есть. Исследования, проведенные в 2002 году, показали, что если у звезды Барнарда и есть планеты, то их масса должна быть меньше предполагаемой ван де Кампом. Совсем недавно, в ноябре 2018 года, многолетний спор был наконец разрешен: у звезды Барнарда обнаружили каменистую экзопланету массой не менее 3 $M_{\oplus}$[30].

Обнаружить изменение координат звезды, создаваемое планетой, невероятно сложно даже сегодня, ведь радиус колебаний звезды в этом случае сопоставим с самим звездным радиусом! Но есть еще один способ обнаружить движение далеких звезд, и связан он не с детектированием периодического изменения координат звезды, а с обнаружением периодического изменения скорости. Этот способ основан на эффекте Доплера.

О том, что изменение скорости звезды может свидетельствовать о наличии у нее планеты, писал еще Отто Струве[28] в 1952 году. К тому же в своей работе он произвел оценку амплитуды колебаний скорости звезды, получаемой от планеты: «Кажется, в настоящее время нет способа обнаружить объекты, соответствующие по массе Юпитеру; также нет бо́льшой надежды, что мы сможем обнаружить объекты и в 10 раз бо́льшие по массе, чем Юпитер, если они находятся на расстоянии одной или нескольких астрономических единиц от их родительских звезд. Но, похоже, нет веской причины, по которой гипотетические звездные планеты в ряде случаев не должны быть намного ближе к своим родительским звездам, чем в нашей Солнечной системе. Было бы интересно проверить, есть ли такие объекты… Не исключено, что планета может существовать на расстоянии 1/50 астрономической единицы, или около трех миллионов километров, от звезды… Если бы масса этой планеты равнялась массе Юпитера, наблюдаемая скорость родительской

звезды колебалась бы в диапазоне ± 0,2 км/с»[31].

Эффект Доплера обычно иллюстрируют с помощью примера с поездом, звук гудка которого при приближении состава становится выше, а при удалении – ниже. Высота звука зависит от воспринимаемой частоты. Звук, как известно, это волна плотности, распространяющаяся в некой среде. Когда поезд приближается, гребни звуковых волн доходят до нас чаще и, следовательно, воспринимаемая частота кажется выше. А когда поезд удаляется, гребни доходят реже и частота звука воспринимается как более низкая. Эффект Доплера характерен для любого типа волн – звуковых и световых, волн на воде.

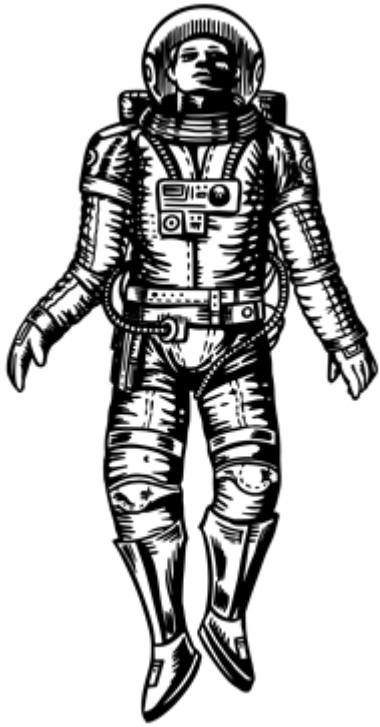
Воспринимаемая частота света, излученного звездой, зависит от того, с какой скоростью звезда движется относительно Земли. Если она удаляется, то воспринимаемый свет, разложенный в спектр, смещается в сторону низких частот – в сторону красного цвета, – а если звезда приближается к наблюдателю, то в ее спектре преобладают оттенки синего. В Галактике есть звезды, существование планетных систем возле которых удобно обнаруживать, наблюдая, как со временем меняются их спектры, – такой способ называют методом доплеровской спектроскопии. Плоскости эклиптик планетных систем этих звезд расположены к нам как бы ребром. Вращаясь вокруг центра масс, звезда в такой системе одну половину своего годичного периода удаляется от нас, а другую – приближается. Если спектр звезды со временем меняется каким-то периодическим образом, значит, звезда движется, а потому вполне вероятно, вокруг нее есть планета или планеты. Графики, показывающие, как спектр зависит от времени, называются спектрограммами.

Но как понять, сдвинулся спектр или нет? Свет рождается в самой горячей части звезд, в ядре, во время реакции ядерного синтеза. Любопытно, что для того, чтобы пробиться сквозь толщу звездного вещества, фотонам, элементарным частицам света, часто необходимо потратить сотни тысяч и даже миллионы лет. Сегодня мы видим свет, рожденный в те времена, когда по Земле ходили еще очень далекие наши предки. В ядре свет генерируется на всех возможных частотах, но, когда он проходит через более холодные наружные слои звезды, в спектре образуются линии поглощения, соответствующие химическим веществам звездной атмосферы. Если линия поглощения сместилась с того положения, где она была некоторое время назад, это говорит о том, что сместилась частота, а значит, звезда движется. Если же удастся увидеть синусоидальное смещение линий поглощения в спектре звезд – это будет свидетельством кругового движения звезды вокруг центра масс ее планетной системы.

Наиболее эффективным способом обнаружения экзопланет стал транзитный метод, именно так искал планеты «Кеплер» и так продолжает искать и исследовать их следующее поколение космических телескопов: *COnvection ROtation and planetary Transits*, или *COROT, Transiting Exoplanet Survey Satellite*, или *TESS*, и *CHaracterising ExOPlanets Satellite*, или *CHEOPS*. Идея транзитного метода самая простая из рассмотренных, но именно поэтому она требует невероятно точной техники. Суть в том, что вместо изучения спектров звезд следить нужно за их блеском – грубо говоря, за количеством принимаемых телескопом в единицу времени фотонов. Если у звезды есть планета, то периодически она заслоняет небольшую площадь звездного диска и звезда ненадолго тускнеет для наблюдателя.

В следующих главах мы более подробно рассмотрим спектроскопический и транзитный методы обнаружения экзопланет, а также (с долей фантазии) попытаемся представить себе пейзажи некоторых из миров, обнаруженных астрономами за последнее время. Здесь, на Земле, еще никто и никогда не встречался ни с чем подобным. Но законы физики и химии, работающие одинаково во всех уголках Вселенной, неминуемо приводят к рождению таких удивительных и разнообразных миров. Только помните, что многие наши выводы могут оказаться ошибочными, ведь даже самые близкие к нам планеты Солнечной системы – те, что мы исследуем напрямую, а не косвенно, реконструируя их поверхности по жалким кусочкам информации, – продолжают преподносить сюрпризы в ходе каждой новой исследовательской программы.

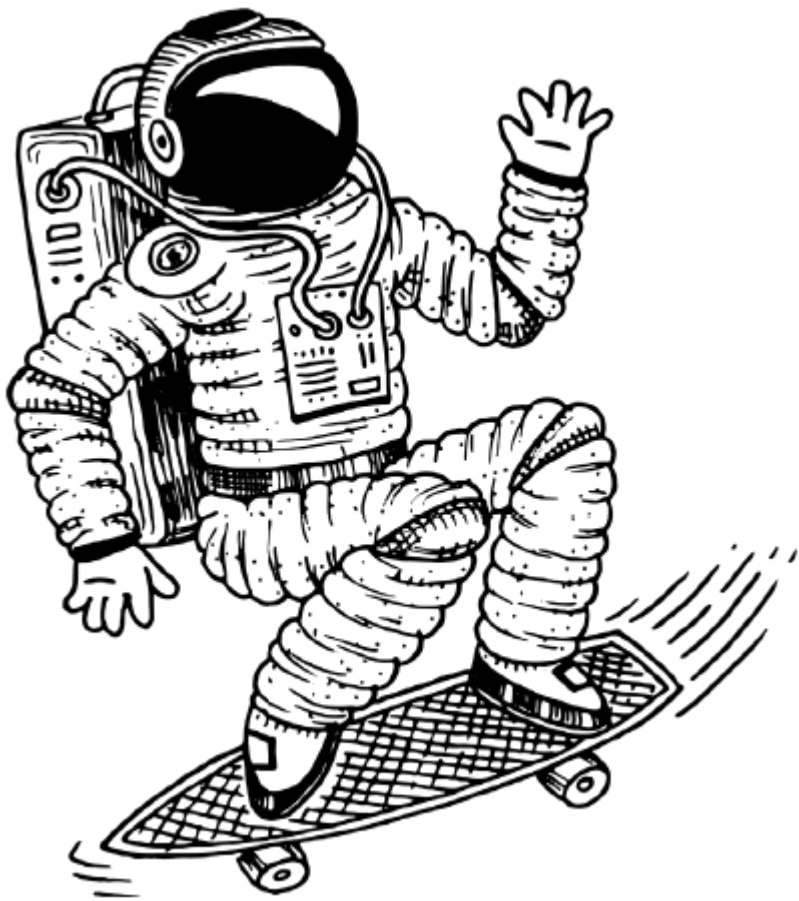
На начало 2020 года, согласно сайту *NASA Exoplanet Archive,* нам достоверно известно о существовании свыше 4 000 экзопланет. Но у нас есть лишь самые общие сведения о них. Возможно, когда-то наши телескопы позволят разглядеть там даже материки и обнаружить следы влияния жизни на рельеф и атмосферу экзопланет. Быть может, однажды космонавты ступят на поверхность чужих планет и своими глазами увидят, что мы были правы (или не правы) в своих предположениях.



Глава 5. Джоселин Белл, пульсары и тайна первой планеты

Когда придет время, моя совесть будет чиста. Я сделала все возможное.

ДЖОСЕЛИН БЕЛЛ



Чтобы рассказать о первой открытой экзопланете, нужно сделать небольшое отступление и познакомиться с Джоселин Белл Бернелл – одним из самых известных астрофизиков, так и не ставшим лауреатом Нобелевской премии, а также ее открытием – одним из самых значительных в астрофизике.

Джоселин Белл родилась 15 июля 1943 года в Белфасте в Северной Ирландии. Ее отец был главным архитектором старинной обсерватории в городе Арма. С детства Белл проводила много времени с сотрудниками этой обсерватории и читала книги о Вселенной из богатой библиотеки отца – в общем, не оставляла себе другого выбора, кроме как посвятить будущую жизнь астрономии.

Окончив Университет Глазго по специальности «физика» с отличием, в 1965 году Белл перебралась в Кембридж – по ее словам, скорее случайно. Она была одной из немногих женщин, которым одобрили заявку на обучение в аспирантуре в таком престижном университете. Когда Белл узнала о зачислении, оказалось, что она подвержена синдрому самозванца: Белл подумала, что закралась какая-то ошибка, ведь она не заслуживает возможности учиться здесь.

В Кембридже Белл начала работать в группе доктора Энтони Хьюиша. Свою научную карьеру тот начал во время войны под руководством Мартина Райла (мы с ним уже встречались в прошлой главе) в Научно-исследовательском центре телекоммуникации в Малверне. Там разрабатывали бортовые радиолокационные системы для авиации. После войны Райл занялся исследованием солнечного радиоизлучения, а затем переключился на более перспективную радиоинтерферометрию. В 1946 году он и его команда создали первый в мире многоэлементный радиоинтерферометр, а чуть позже обнаружили четыре радиозвезды – космические радиоисточники, никак не связанные с обычными звездами. (Позже, уже в 1950-х годах, оказалось, что эти таинственные радиозвезды представляют собой новый тип далеких активных галактик. Их стали называть квазарами.)

В 1948 году Мартин Райл перебрался в Кембридж, где начал читать лекции, а также руководить научной группой в Кавендишской лаборатории. В том же году к группе Райла перебрался Энтони Хьюиш, который занялся выяснением причин недавно обнаруженного мерцания излучения радиозвезд. В итоге, когда оказалось, что это мерцание связано с нарушением условий в верхних слоях атмосферы, Мартин Райл потерял к явлению интерес, а Хьюиш увидел возможность для самостоятельных научных поисков. Так Райл и Хьюиш и продолжали работать – совместно над радиоинтерферометрами и обособленно над собственными проектами.

Но вернемся к Джоселин Белл, присоединившейся к группе Энтони Хьюиша. Он еще с 1965 года намеревался провести крупномасштабное исследование по установлению точных

координат уже известных квазаров и поиску новых. Для этого Хьюиш инициировал строительство радиотелескопа, способного «разрешать» события, разделенные интервалом всего в 0,1 с, он назвал его «Межпланетный сцинтилляционный массив». Площадью 16 км2 – чуть больше, чем два футбольных поля, – радиотелескоп состоял из 4 096 простых антенн, объединенных в интерферометрическую сеть. Чтобы соединить все антенны, необходимо было смонтировать около 200 км проводов – и этот труд Хьюиш полностью взвалил на плечи учеников. При зачислении в радиоастрономическую лабораторию Хьюиша, по воспоминаниям Белл, каждому студенту выдавался набор инструментов: плоскогубцы, кусачки и отвертка[29].

Поначалу Белл наравне с остальными студентами занималась монтажными работами, но, когда летом 1967 года «Межпланетный сцинтилляционный массив» заработал, она переключилась на изучение получаемой с него информации. Все принятые данные передавались на самописцы, выдававшие в день по 30 м картографической бумаги с красной линией, регистрирующей интенсивность радиоисточников. Во времена, когда не существовало никаких компьютеров, просматривать ленты приходилось людям. Задача Белл состояла как раз в этом.

Рисунок 9. Джоселин Белл

Белл просматривала буквально километры распечаток, регистрировавших радиосигналы, в поисках квазаров, а в перерывах, вооружившись плоскогубцами, латала фазированные решетки радиотелескопа. Работая таким образом, она заметила необычный сигнал: серию слабых и регулярных радиоимпульсов с периодом около 1,3 с. На ленте они занимали всего пару сантиметров. Впоследствии Белл рассказывала об этом так: «Это был очень, очень слабый сигнал. Он занимал примерно одну

стотысячную долю из трех миль картографических данных, которые у меня были. Я заметила это, потому что была невероятно осторожна и очень внимательна из-за синдрома самозванца. Пусть меня выгонят, но до этого времени я буду работать очень усердно. Когда придет время, моя совесть будет чиста. Я сделала все возможное». Хьюиш сначала подумал, что обнаруженное Белл явление – это переотраженный в атмосфере сигнал с Земли. Холодная война была в самом разгаре, и такой источник мог означать все что угодно.

В течение нескольких последующих месяцев Хьюиш и Белл занимались тем, что перепроверяли все возможные источники таинственных радиоимпульсов. Когда стало понятно, что сигналы имеют все же внеземное происхождение, ученые полушутя назвали их *LGM – Little Green Men* («Маленькие зеленые человечки»): совсем недавно началась и космическая эра, так что воздух был пронизан предвкушением встречи с инопланетянами. Вскоре в других частях неба были обнаружены еще три подобных радиоимпульса, но с другим периодом. Стало понятно, что это не радиомаяк какой-то инопланетной цивилизации, а некий новый тип астрономических объектов.

Название им было придумано случайно. Во время интервью для газеты *The Daily Telegraph* в 1968 году научный корреспондент спросил Белл, как следует называть эти радиоимпульсы, и сам же предложил вариант «пульсар» как производную от выражения «пульсирующий квазар». На том и остановились, а название прижилось.

О своем открытии ученые написали две статьи в *Nature* – в самый известный научный журнал в мире[32, 33]. Белл защитила докторскую диссертацию по квазарам – менять тему было уже поздно, но она добавила приложение с подробностями об открытии пульсаров. Однако общество, по-видимому, еще не было готово к тому, что открытие может совершить недавний студент. В 1974 году Нобелевский комитет присудил премию по физике Мартину Райлу, за новаторские исследования в радиоастрофизике, и Энтони Хьюишу, за решающую роль в открытии пульсаров, – безусловно, достойным людям. Белл в список номинантов на премию не попала.

В результате разгорелся скандал. По мнению общественности, именно Джоселин Белл сделала величайшее открытие в астрофизике и именно ей должны были присудить Нобелевскую премию. Но, судя по всему, сама Белл, в силу природной скромности, не очень расстроилась. Она сделала прекрасную карьеру, получила множество наград и премий и в 2013 году вошла в сотню самых известных женщин

Великобритании. Наконец, в 2018 году она была удостоена Премии за прорыв в области фундаментальной физики в размере трех миллионов долларов (как три Нобелевские премии) за открытие радиопульсаров. Все деньги Белл пожертвовала Институту физики в Лондоне на «финансирование выпускников из недостаточно представленных групп – женщин, представителей этнических меньшинств и беженцев, чтобы они могли стать учеными-физиками».

Что же такое пульсары, которые впервые обнаружила Джоселин Белл? Согласно современным представлениям, пульсар – это то, что остается от некоторых звезд на последних стадиях их эволюции. В первой главе рассказывалось, что звезда – это шар, состоящий из плазмы. Звезды рождаются, аккумулируя огромное количество газа, сжимаясь под действием собственной гравитации во все более плотные и горячие сгустки вещества. В какой-то момент плотность и давление внутри звезды достигают такой величины, что начинаются самоподдерживающиеся реакции ядерного синтеза: более легкие ядра превращаются в более тяжелые. Каждая последующая реакция требует все более высоких температур и давления. Когда в центре звезды закончится весь доступный водород, давление и температура возрастут настолько, что начнутся термоядерные реакции с гелием; когда закончится гелий, настанет время углерода, горение углерода сменится горением кислорода и так далее. Элемент, на котором прекратится термоядерный синтез, зависит от начальной массы звезды: так, в случае с Солнцем все остановится на углероде – чтобы «переплавить» его в кислород массы нашей родной звезды недостаточно.

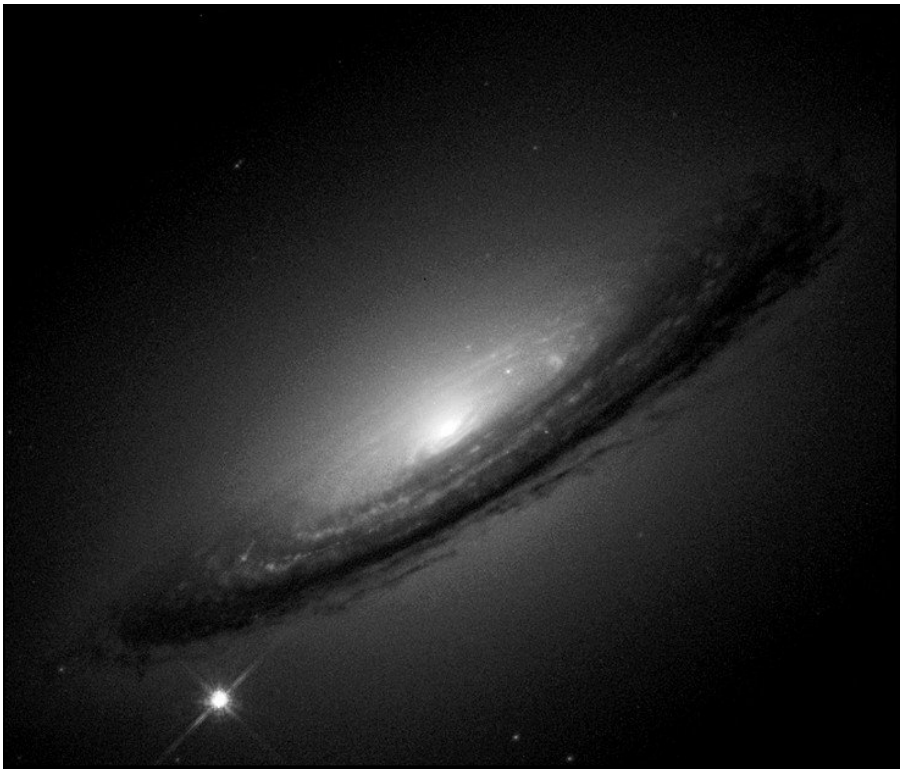


Рисунок 10. Галактика *NGC* 4526 и ее сверхновая 1994 *D* (слева внизу). Изображение получено с помощью телескопа «Хаббл»

Если масса звезды больше 8 $M_{\oplus}$, то химические элементы в ее центре последовательно переплавляются во все более и более тяжелые элементы, вплоть до железа. На железе процесс останавливается. Дело в том, что для того, чтобы превратить железо во что-то более тяжелое, необходимо поглотить дополнительную энергию, тогда как в ходе предыдущих реакций она выделялась. Следовательно, ядерный синтез железа приведет к снижению температуры звезды. Как только это произойдет, внутреннего давления звезды окажется недостаточно, чтобы удерживать ее массу: внешние оболочки звезды обрушатся на ядро и, как брошенный с высоты мячик, отскочат в космическое пространство. Взрыв звезды порождает невероятно яркую вспышку (взрыв сверхновой). Яркость звезды увеличивается в десятки и даже сотни миллионов раз, а количество энергии, излучаемой сверхновой во время взрыва, больше, чем то, что излучают одновременно все звезды Галактики.

После взрыва на месте сверхновой остается компактный

сверхплотный объект. Дальнейшая его судьба зависит опять-таки от его массы. Если она больше 2 $M_{\oplus}$, уже ничего не сможет помешать его коллапсу: объект обрушится внутрь себя и превратится в черную дыру – область с такой сильной гравитацией, что даже свет не может покинуть ее. Если же масса объекта меньше, коллапс остановится ядерными силами и образуется быстровращающаяся нейтронная звезда. При радиусе примерно 20 км и массе, близкой к массе Солнца, плотность звезды такова, что электронные оболочки атомов буквально вдавливаются в протоны, образуя тем самым нейтроны.

У нейтронных звезд есть интересная особенность. Магнитное поле, которым они обладают, имеет напряженность в миллиарды раз бóльшую, чем на сегодняшний день смогли получить ученые в лабораториях. Даже атомы вещества, попав в такое поле, выстраиваются вдоль линии магнитного поля и становятся похожи на цилиндры, а не на сферы. Ученые до сих пор дискутируют на тему того, как образуется столь сильное поле. Это магнитное поле генерирует поток радиоизлучения. Как и на Земле, оно имеет северный и южный магнитные полюсы. Эти полюсы не обязательно совпадают с осью вращения звезды. (Так же и на Земле: северный полюс, тот, на который указывает стрелка компаса, не совпадает с географическим Северным полюсом примерно на 11°.) Ускоряясь в магнитном поле, электроны и другие заряженные частицы генерируют мощный поток радиоизлучения, которое, в свою очередь, подхватывается магнитным полем, увлекается им и вращается вместе с нейтронной звездой. Это похоже на вращающийся луч света от маяка: если ночью находиться далеко от него, кажется, будто свет мигает. На Земле мы регулярно фиксируем всплески радиоимпульсов[30]. Нейтронные звезды, от которых с Земли можно наблюдать периодические всплески радиоизлучения, и называются радиопульсарами.

Джоселин Белл в далеком 1967 году обнаружила именно такой объект, поток радиоизлучения которого раз в 1,337 с пробегал по поверхности Земли. И именно возле подобного объекта ровно через четверть века была зафиксирована первая экзопланета. После открытия Белл и Хьюиша астрономы со всего мира принялись искать пульсары, и сегодня мы знаем о тысячах таких объектов.

В январе 1992 года в *Nature* появилась статья[34], в которой польский астрофизик Александр Вольщан (который, кстати, получил образование в университете города Торун, где в свое время учился Николай Коперник, – астрономический мир тесен!) привел доказательства того, что возле пульсара *PSR* 1257 + 12[31]

есть планеты. Его метод основывался на тщательном измерении частоты прихода импульсов от нейтронной звезды.

Открытие пульсаров нельзя назвать случайностью. Напротив, история открытия экзопланет начинается со счастливого случая. Вольщан занимался изучением миллисекундных пульсаров – пульсаров, имеющих период до нескольких десятков миллисекунд (их происхождение связывают уже не со взрывом сверхновых, а с двойными системами, один из компаньонов в которых – нейтронная звезда). Он проводил свои исследования на крупнейшем в мире (на тот момент) радиотелескопе «Аресибо» в Пуэрто-Рико. Этот телескоп имеет диаметр более 300 м и располагается в естественном углублении в горах. Во время наблюдений чаша телескопа остается неподвижной, а фокусировку на астрономических объектах обеспечивает перемещающаяся управляемая антенна, прикрепленная к трем опорам. Если бы телескоп функционировал как обычно, заявку Вольщана на работу с ним просто отклонили бы, но управляемая антенна в тот момент находилась в нерабочем состоянии, поэтому спрос на телескоп упал и заявку приняли.

Как и Белл, Вольщан не искал то, что в итоге нашел, – целью его работы было исследование миллисекундных пульсаров. Обнаружил же он два новых пульсара. Первый входил в достаточно интересную систему двух вращающихся друг относительно друга нейтронных звезд. Но потом его внимание привлек другой пульсар – *PSR* 1257 + 12 с периодом вращения 6,2 мс. Дело в том, что во времени прихода радиоимпульсов от этого пульсара не было ожидаемой регулярности (у некоторых пульсаров точность периодов превосходит точность атомных часов). Вольщан обнаружил, что во времени прихода сигналов от пульсара *PSR* 1257 + 12 наблюдались незначительные, но регулярные отклонения.

С помощью телескопа *Very Large Array* («Очень большая антенная решетка»), или *VLA*, названного по традиции очень оригинальным образом, Вольщан перепроверил координаты, а также уточнил периоды накладывающихся на пульсацию возмущений – они оказались равны 66,6 и 98,2 суток. Будь у *PSR* 1257 + 12 два компаньона, эту нерегулярность можно было бы объяснить. Но что это за компаньоны? Вряд ли кто-нибудь в то время предполагал, что компаньонами могут оказаться не другие звезды. Но, используя законы Кеплера, Вольщан оценил массы потенциальных компаньонов *PSR* 1257 + 12, и они оказались слишком малыми для звезд.

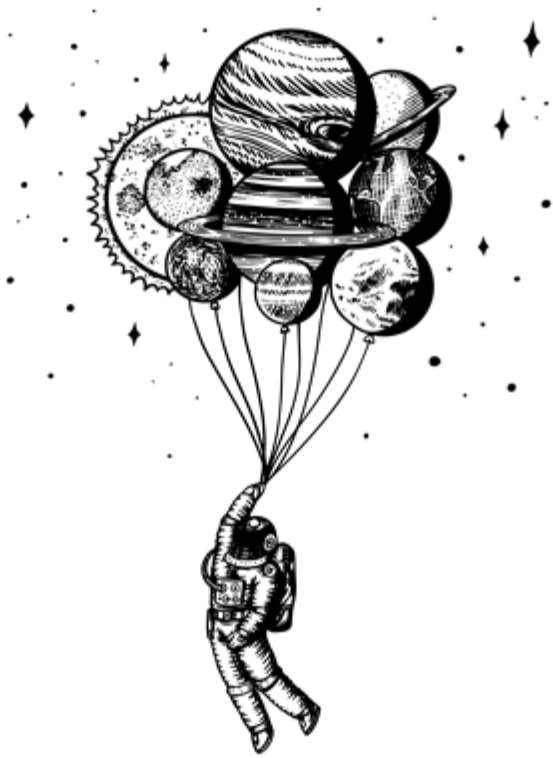
Вольщан долго не понимал, что ему посчастливилось обнаружить. Но, как говорил знаменитый герой Конан Дойла,

«отбросьте все невозможное, то, что останется, и будет ответом, каким бы невероятным он ни казался». Вот и у Вольщана остался самый невероятный ответ: на орбите вокруг пульсара находятся две планеты, каждая из которых в четыре раза больше Земли. Позже выяснится, что в их дружной компании есть еще одна планета примерно вдвое больше Луны.

Самая сложная загадка заключается в том, как эти планеты там оказались. Как вы, вероятно, уже поняли, область пространства возле пульсара – это последнее место во Вселенной, где разумный человек будет искать планеты. Мощнейший взрыв сверхновой испарит все в ее планетной системе. Так почему же эти странные планеты оказались так близко к пульсару? Точный ответ на этот вопрос не известен никому. Рассматривается два варианта: экзопланеты были захвачены извне, или же они образовались из вещества, выброшенного сверхновой. Но что произошло на самом деле, в ближайшее время мы, скорее всего, не узнаем. Как бы то ни было, открытие состоялось, и экзопланеты возле пульсара *PSR* 1257 + 12 вошли в историю как первые обнаруженные и подтвержденные планеты вне Солнечной системы.

В тот день, когда человечество полетит к звездам, возможно, именно пульсары будут использоваться в качестве естественной навигационной системы. Идея определения положения и скорости космического корабля по пульсарам была предложена еще в 1974 году[35]. Сейчас открыто несколько типов пульсаров, являющихся источником излучения в радио-, гамма– и рентгеновском диапазонах волн. Рентгеновские пульсары отлично подходят для космической навигации: принимающий рентгеновское излучение детектор может иметь площадь около 100 см*2*, тогда как для регистрации радиопульсаров, например, нужны тарелки диаметром 25–100 м. Когда космический корабль летит в пространстве, он меняет свое положение относительно Земли и выбранного рентгеновского пульсара, характеристики излучения которого мы знаем: надо всего лишь сравнить рассчитанное и фактическое время прибытия радиоимпульса, чтобы определить координаты и скорость космического аппарата по отношению к Земле. Система, использующая три и более пульсаров, позволит вычислить координаты космического аппарата относительно Земли. В 2017 году космический аппарат *NICER* в качестве подтверждения целесообразности этого метода смог определить свое положение с точностью до 5 км[36], наблюдая за пятью пульсарами с орбиты вокруг Земли. Это стало первой демонстрацией в космосе метода пульсарной навигации. В недалеком будущем мы сможем определять положение

космических кораблей с точностью до 2 км на расстоянии до 30 а. е. от Земли![37]



Глава 6. Метод радиальных скоростей и Галактика, полная странных планет

Хотя мы понимаем, как определить форму [звезд], их массу и движения, мы никогда не сможем исследовать их химический и минералогический состав… или даже их плотность.

ОГЮСТ КОНТ

Планеты около пульсара *PSR* 1257 + 12 были странными. Но не менее странной оказалась и следующая обнаруженная экзопланета. В 1994 году швейцарские астрономы Мишель Майор и Дидье Кело открыли первую планету возле солнцеподобной звезды. За это они удостоились Нобелевской премии по физике в 2019 году, разделив ее с космологом Джеймсом Пиблсом.

Остановимся на этом открытии подробнее. Начать мне хочется с описания истории и сути метода доплеровской спектроскопии, благодаря которому и было совершено открытие.

Наука, изучающая спектры, словно поставившая себе цель опровергнуть слова философа-позитивиста Огюста Конта, вынесенные в эпиграф к этой главе, – спектроскопия, позволила находить невидимые ни в один телескоп планеты у далеких звезд[32]. И это стало настоящим подарком для астрофизиков. Но путь к звездам оказался тернистым и занял три столетия. Как же сложно определить время и место начала этой истории! Усилием воли предположим, что первый шаг сделал Исаак Ньютон в 1666 году, стеклянной призмой разложив пучок света в радужную полоску. Этот опыт, описанный во всех учебниках физики для средней школы, наверное, впервые показал, что обычно видимое и воспринимаемое нами – всего лишь иллюзия. О своем опыте Ньютон писал следующее: «В начале 1666 года (в это время я занимался шлифовкой стекол иных форм, чем сферические) я достал треугольную стеклянную призму, чтобы произвести с нею опыты над знаменитым явлением цветов. Для этой цели, затемнив свою комнату и проделав небольшое отверстие в оконных ставнях для пропускания в нужном количестве солнечного света, я поместил призму там, где входил свет, так что он мог преломляться к противоположной стене. Зрелище живых и ярких красок, получавшихся при этом, доставляло мне приятное удовольствие»[38].

Исаак Ньютон

В этом, ставшем хрестоматийным, опыте Ньютон разложил свет в радужный спектр. И хотя это явление, даже по словам самого ученого, уже было знаменито – о разложении солнечного света на цвета писали Рене Декарт, Франческо Мария Гримальди и Роберт Гук, – заслуга Ньютона состоит в том, что он, судя по всему, первым получил четкий спектр, состоящий из семи цветов, и связал с каждым цветом показатель преломления. Все исследователи до него довольствовались лишь мутными картинками. Ньютоновская интерпретация опытов вызвала сопротивление у уже известных и заслуженных оптиков того времени, у того же Гука например, но в конечном счете она оказалась верна.

В 1800 году исследовать спектры взялся астроном Уильям Гершель. В своих опытах он помещал чувствительный термометр в разные участки разложенного в спектр луча солнечного света. Оказалось, что помещенный в красную часть спектра термометр нагревается сильнее всего, а в фиолетовую – слабее всего. Более того, Гершель обнаружил, что термометр, помещенный за пределы красного цвета в невидимую глазу область, нагревается еще сильнее[39]. Теория о существовании невидимого более «горячего», чем даже в красной части спектра, излучения напрашивалась сама собой. Так были открыты инфракрасные лучи. Гершель также заметил, что мельчайшие доли примесей в горючем веществе дают различные цвета пламени, и он был первым, кто предложил по цвету огня определять химический состав смесей различных веществ.

Чуть позже Томас Юнг установил, во-первых, что свет имеет волновую природу, а во-вторых, что цвет излучения зависит от длины волны света. Свет, распространяющийся в пространстве, можно представить себе волнами на глади пруда. Длина волны, и ее частота, связаны следующим образом:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

где *c* – скорость распространения волны света (в вакууме она равна 300 000 км/с и одинакова для всех видов электромагнитного излучения.

Следующее важное событие произошло в 1802 году. В этом году английский химик и минералог Уильям Хайд Волластон опубликовал статью, в которой сообщал о неких темных промежутках в солнечном спектре[40]. К сожалению, природу темных линий он не понял, а потому не смог осознать и значимость совершенного им открытия. Ничего интересного в нем не увидели и читатели статьи. На самом же деле эти промежутки оказались линиями поглощения, о которых я уже упоминал.

В 1814 году изучением свойств солнечного света занялся молодой немецкий оптик Йозеф Фраунгофер. В исследованиях ему помогали стекла непревзойденного на тот момент качества, изготовлявшиеся на принадлежащей ему фабрике. Вместо пяти линий поглощения Волластона Фраунгофер смог увидеть их целое множество. Он обнаружил, что линии поглощения в солнечном спектре соответствуют определенным частотам[41] – с тех пор эти линии называют линиями Фраунгофера.

Йозеф Фраунгофер не ограничился исследованиями спектра Солнца и изучал спектры других планет и звезд: Венеры, Марса, Сириуса, Кастора, Бетельгейзе и так далее. Линии поглощения наблюдались у всех исследуемых Фраунгофером звезд: они напоминали своего рода отпечатки пальцев, опознавательные знаки, отличавшие одну звезду от другой, – у каждой из звезд свой уникальный набор. А вот спектр Венеры оказался удивительно похожим на спектр Солнца, и это значило, что Венера светит отраженным светом Солнца. В 1859 году Густав Кирхгофф показал, что линии поглощения в спектрах соответствуют химическим элементам в составе излучающих тел, и объяснил, какие линии с какими элементами соотносятся[42]. Три из пяти темных полос, обнаруженных Волластоном, чуть позже идентифицировали как линии поглощения, соответствующие натрию, молекуле *CH* и ионизированному кальцию.

Кристиан Доплер

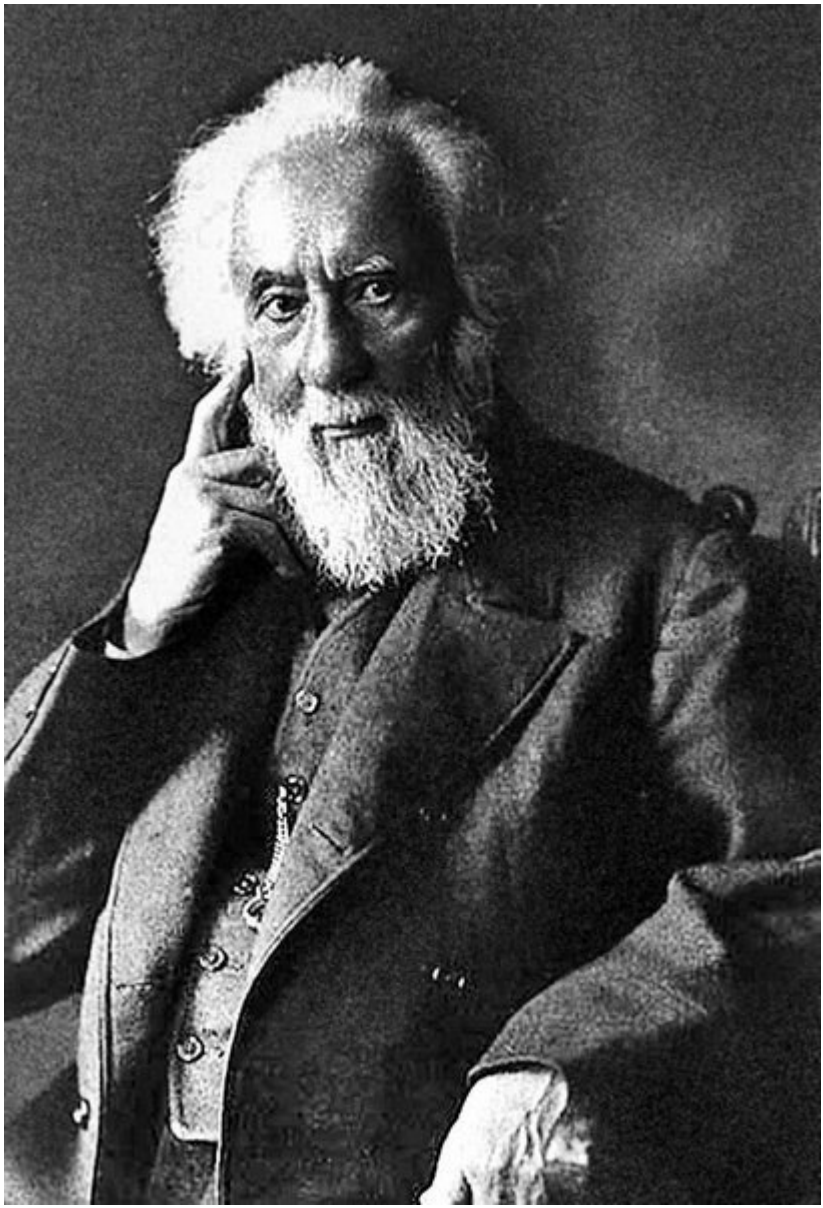
В мае 1842 года Кристиан Доплер, профессор математики в Пражском университете, прочитал лекцию для богемского научного сообщества, в которой утверждал, что свет, подобно звуку, может претерпевать изменение частоты вследствие движения источника. В этой лекции он сделал ошибочное предположение, что звезды движутся друг относительно друга со скоростями, которые составляют значительную часть от скорости света. Следовательно, в силу эффекта Доплера меняется частота воспринимаемого нами света. Если звезда удаляется, мы видим ее красной или оранжевой, а если приближается, то голубой.

Всего через несколько лет после Доплера, в 1848 году к идее аналогичного движения звуковых и световых источников пришел французский физик Арман Ипполит Луи Физо. В отличие от Доплера он правильно заметил, что цвет движущегося объекта никак не может измениться, поскольку все световые лучи в

спектре смещаются одинаково и «каждый луч занимает место луча, который обладал этой же длиной волны, когда светящееся тело было в покое». Но все же относительная скорость звезды, как отмечал Физо в той же работе, может быть обнаружена путем измерения смещения спектральных линий поглощения[43].

В астрофизике метод измерения скоростей звезд, основанный на эффекте Доплера – Физо, называют методом доплеровской спектроскопии, методом радиальных скоростей, а также, что чаще встречается в отечественной литературе, методом лучевых скоростей. В общем случае движение звезды можно представить как сумму трех движений: радиального – вдоль радиуса небесной сферы, и двух угловых – в полярном и азимутальном направлении. Метод радиальных скоростей позволяет определить только радиальную составляющую движения. Мы еще поговорим о том, к каким проблемам это приводит.

Первая публикация об успешных измерениях радиальных скоростей звезд на основе спектрального анализа была сделана английским астрономом-любителем, не имеющим даже университетского образования в области естественных наук, Уильямом Хаггинсом. В 1868 году он отправил в Королевское общество статью, посвященную измерению радиальной скорости Сириуса[44]. Никаких точных инструментов в то время не существовало, и сравнение спектров небесных тел с эталонными спектрами производилось визуально. В своем эксперименте, как выяснилось позже, Хаггинс получил неверное значение и даже неправильно определил знак радиальной скорости Сириуса. Но все же идея таких экспериментов показалась интересной астрофизикам. Началась эпоха звездной астрофизики. Визуальное определение точных смещений спектральных линий было невероятно сложным. Значения радиальных скоростей звезд, которые получали ученые того времени, имели большие погрешности: величины скорости, вычисленные для одной и той же звезды, отличались на десятки километров в секунду.



Уильям Хаггинс

Астрономы сражались даже за минимальное уточнение измерений. К 1900 году точность измерения радиальных скоростей составляла уже единицы километров в секунду (в основном за счет измерения скоростей туманностей – космических объектов, содержащих множество звезд, обладающих примерно одинаковыми радиальными скоростями).

В течение первых 70 лет XX века астрономы совершенствовали классические методы измерения спектров. И в 1967 году наконец произошло кое-что интересное: Роджер Гриффин из Кембриджского университета впервые использовал новую технику для определения радиальных скоростей звезд и достиг успеха[45]. Основная идея состояла в том, чтобы совместить спектрограф с системой, измеряющей сдвиги нескольких спектральных линий одновременно (за 14 лет до этого, в 1953 году, эту идею предложил британский ученый Питер Филгетт). Гриффин измерил спектр одной из ярчайших звезд – красного гиганта Арктур – и изготовил специальную маску-шаблон с 240 прорезями на месте линий поглощения в этом спектре. Затем он направлял телескоп на другую звезду, температура поверхности и, соответственно, спектральный тип которой не слишком отличались от температуры и спектрального типа Арктура. Положение маски с помощью микрометрического винта настраивалось таким образом, чтобы прорези максимально точно совпали с линиями поглощения исследуемой звезды. При идеальном совмещении свет бы практически не проходил через маску, но, очевидно, такого быть не могло, так как радиальная скорость и спектр любой из звезд должны отличаться от этих же характеристик Арктура. Однако, если найти такое положение маски, при котором она пропускает минимальное количество света, можно вычислить значение относительной разности радиальных скоростей исследуемых звезд.

Через два года после начала работы со спектрографом, в 1969 году, Гриффину удалось достигнуть погрешности в ± 640 м/с при измерении радиальной скорости звезд. Вдохновленные его

успехом, Андре Баран и Мишель Майор в 70-х годах разработали более совершенный прибор, работающий по тому же принципу (их метод получил название «метод взаимной корреляции»). В 1977 году в Марсельской обсерватории они представили новый спектрометр *CORAVEL*, обладавший бóльшими техническими возможностями, чем спектрометр Гриффина (в том числе благодаря использованию нового компьютера), и имевший погрешность уже ±150–250 м/с[46]. Прибор работал со звездами солнечного типа, и поэтому значения скоростей находились относительно скорости Солнца. Было изготовлено две копии спектрометра: одна для обсерватории Верхнего Прованса, а другая для датского телескопа в обсерватории Ла-Силья в Чили. Эти приборы стали самыми эффективными спектрометрами своего времени. С их помощью сделали много открытий, касающихся двойных и переменных звезд, звезд в Магеллановом облаке[33] и шаровых скоплениях. Также удалось выяснить, что коричневые карлики[34] – довольно распространенные объекты, часто находящиеся на орбитах вокруг других звезд.

Метод измерения сдвигов в спектре звезд, который использовал Гриффин, вообще говоря, не позволял отличить инструментальные и атмосферные погрешности от особенностей спектров звезд. Но решение нашлось довольно быстро. Было известно, что газы, составляющие земную атмосферу, формируют в попадающем в телескоп свете от космического источника уникальный рисунок из линий поглощения, называемых теллурическими. И в 1973 году для измерения радиальных скоростей звезд в качестве эталона длины волн решили использовать теллурические линии молекулярного кислорода – относительно него и начали вычислять доплеровские сдвиги в спектрах звезд[47]. Реализация этого недорогого и легко осуществимого метода позволила увеличить погрешность измерения радиальных скоростей звезд примерно до ±20 м/с.

На полученный от звезды свет, помимо инструментальных, накладывались искажения от переменчивой, находящейся в вечном движении атмосферы. Теллурический метод не позволял устранить дрожание земной атмосферы, что оказывало значительное влияние на точность измерений. Но если использовать естественную атмосферу нельзя, то, конечно же, необходимо создать собственную! Делается это следующим образом: берется герметичная стеклянная ячейка, наполняется нужным газом и размещается на оптическом пути света, падающего в телескоп, непосредственно перед щелью спектрографа. В итоге получается стабилизированная по температуре безветренная «атмосфера» с постоянным спектром,

линии поглощения которой служат эталоном длины волн. Наличие такой «линейки» позволяет еще точнее определять смещение спектральных линий в принимаемом свете звезд.

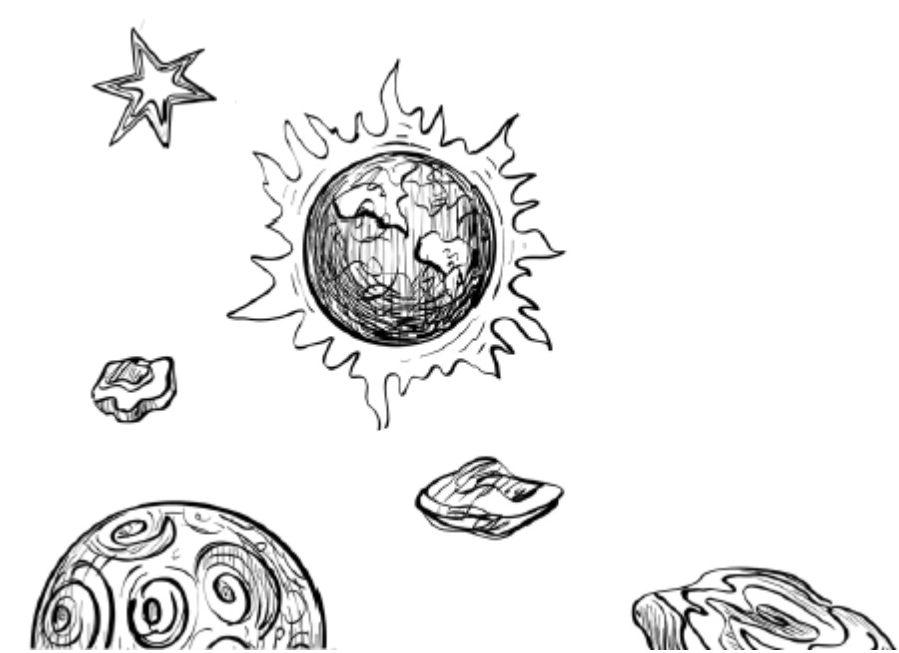
Первыми, кто использовал газовые ячейки для определения радиальных скоростей звезд, были канадские ученые Гордон Уокер и Брюс Кэмпбелл, недавно защитивший докторскую диссертацию[35]. Для своих исследований они выбрали 3,6-метровый телескоп на Гавайях с традиционно неприхотливым названием *Canada – France – Hawaii Telescope* («Телескоп Канада – Франция – Гавайи»), или *CFHT*[36]. В 1979 году Уокер и Кэмпбелл предложили использовать в качестве эталона длины волн линии поглощения фтористого водорода[48]. Работать с фтористым водородом из-за его токсичности было небезопасно, но оно того стоило! Погрешность измерения радиальных скоростей теперь составляла ±15–25 м/с, и на нее никак не влияла переменчивая атмосфера Земли. Для сравнения: амплитуда колебания радиальной скорости движения Солнца, вызванная взаимодействием с Юпитером, составляет около 13 м/с. Если бы Юпитер имел чуть бóльшую массу или находился чуть ближе к Солнцу, амплитуда колебания радиальной скорости Солнца как раз попадала бы в «рабочий диапазон» спектрометра на телескопе *CFHT*. Это означает, что прибор, построенный Уокером и Кэмпбеллом, потенциально мог обнаруживать экзопланеты массой в несколько масс Юпитера. Гонка началась!

Благодаря методу доплеровской спектроскопии можно не только обнаруживать звезды, обладающие планетными системами, но и получать важную информацию об их планетах. Давайте считать, что у звезды вращается только одна планета. Наличие других планет принципиально ничего не изменит, но увеличит длину формул для расчетов. Итак, для начала нужно вычислить массу родительской звезды и расстояние между Солнцем и этой звездой, а затем искать массу планеты и параметры ее орбиты. Расстояние до относительно близкой звезды проще всего находить, измеряя годичный параллакс (большую полуось земной орбиты делим на параллакс). Световой поток слабеет пропорционально квадрату пройденного расстояния, а следовательно, легко определяется светимость звезды. Ну а масса звезд пропорциональна их светимости, поэтому тоже легко находится. Получив основные характеристики звезды, астрономы вычисляют характеристики планеты.

Период колебаний радиальной скорости звезды равен периоду орбитального вращения планеты. Зная, сколько на планете длится год, можно рассчитать расстояние между планетой и звездой согласно третьему закону Кеплера. Масса

предполагаемой планеты прямо пропорциональна амплитуде колебания радиальной скорости звезды. Важно то, что радиальная скорость дает нам только минимальную массу гравитационно связанного со звездой объекта, поскольку радиальная скорость – лишь составляющая полной скорости звезды. Масса планеты, которую находят благодаря методу радиальных скоростей, может быть представлена как произведение двух неизвестных величин: фактической массы планеты и *sin(i)* – множителя, который характеризует наклон орбиты по отношению к земному наблюдателю.

Открывателями первого внесолнечного мира хотели быть многие, но Уокер и Кэмпбелл в 80-х годах стали фаворитами этой гонки. Они сосредоточили свои усилия на наблюдениях всего лишь за 20 звездами, надеясь, что среди них окажется звезда с собственной планетой. И удача им улыбнулась. В 1988 году, через семь лет после начала охоты, они объявили, что обнаружили экзопланету у звезды в двойной системе Гамма Цефея[49]. Звезда демонстрировала переменчивую амплитуду радиальной скорости в 25 м/с с периодом 2,5 года. Это была заявка на грандиозный успех, но уже в 1992 году ученые опубликовали статью с опровержением этого открытия, так как они посчитали, что перепутали собственное вращение звезды с влиянием планеты-компаньона.



Почти одновременно с Уокером и Кэмпбеллом, в 1989 году,

Дэвид Латам объявил об открытии совместно с коллегами внесолнечной планеты *HD* 114762 *b* в 126 св. годах от Земли[50]. Неуклюжее название планеты происходит из астрономического правила именовать звезды следующим образом: первые буквы и цифры представляют звезду, вокруг которой вращается планета (*HD* значит, что звезда взята из каталога Генри Дрейпера, 114762 – ее координаты на небе), а буква в конце (в данном случае *b*) соответствует порядковому номеру планеты (*b* – первая планета от звезды, *c* – вторая, *d* – третья и так далее). Буква *a* закрепляется за самой звездой, но часто опускается. Если же звезды принадлежат к двойной системе, то одна звезда обозначается заглавной буквой *A*, а другая – *B*.

Громкого открытия не получилось. У исследователей оставались сомнения в том, была ли обнаружена именно планета. Могло случиться и так, что это, например, компаньон *HD* 114762 – никакая не планета, а звезда, и она вращается по орбите, имеющей *sin(i),* близкий к 0. В этом случае для наблюдателя с Земли система вела бы себя точно так же, как и звезда с планетой, находящейся на орбите с *sin(i)*, близким к 1. Всё как у людей: внешность обманчива. В 2002 году выяснилось, что *HD* 114762 на самом деле двойная звездная система, но вопроса о наличии у *HD* 114762 *A*[37] экзопланеты это не снимало[51]. В 2012 году подтвердилось существование газового гиганта или коричневого карлика на орбите вокруг *HD* 114762 *A*[52]. А в 2019-м удалось доказать, что звездный спутник имеет орбиту с крайне низким наклоном (большим *sin(i))* и, следовательно, массу, превышающую 100 M_J[53]. Таким образом, *HD* 114762 *A b* является коричневым или даже красным карликом.

В 1989 году Дидье Кело, аспирант Мишеля Майора, начал работать над докторской диссертацией. Его задача заключалась в написании программного обеспечения для нового спектрометра *ELODIE*. Этот спектрометр, созданный Андре Бараном и Мишелем Майором, должен был заменить *CORAVEL* в обсерватории Верхнего Прованса. Перед ними стояла цель достигнуть погрешности измерения радиальных скоростей звезд хотя бы в ± 50 м/с. Такой показатель представлялся достаточным для поиска и изучения коричневых карликов.

Одной из инноваций *ELODIE* был отказ от газовых ячеек и замена их на плазменные ториевые лампы, создающие вместо линий поглощения характерные линии излучения. Такой способ калибровки длины волн был более трудозатратным в реализации и мог дать даже бóльшие инструментальные погрешности, чем при использовании газовых ячеек. Однако риски погрешностей были снижены благодаря использованию оптоволокна для

передачи света от телескопа на теплоизолированный спектрометр (еще одно новшество *ELODIE*), поддержанию постоянной температуры в помещении, где находился спектрометр, и возможности работать с более широкой частью спектра. Программное обеспечение, написанное Кело, позволяло находить радиальные скорости звезд всего за несколько минут. А после того как с помощью *ELODIE* начали проводить измерения радиальных скоростей, оказалось, что погрешность составляет примерно ± 13 м/с! Это стало для Майора и Кело сюрпризом и большой удачей.

Благодаря тому, что их инструмент работал намного лучше, чем ожидалось, Мишель Майор и Дидье Кело решили заняться поисками гигантских планет. В апреле 1994 года они начали следить за 142 яркими звездами, а уже в ноябре 1994 года Дидье Кело обнаружил, что 51 Пегаса ведет себя очень странно: ее радиальная скорость менялась с периодом около 4,2 суток. Звезда как будто танцевала в пространстве. И это говорило о том, что на орбите вокруг нее находится некий массивный объект с очень коротким периодом обращения.

Когда Кело рассчитал массу планеты и радиус ее орбиты, он был очень озадачен. Полученные значения не имели никакого смысла и выглядели нелепо. По ним выходило, что экзопланета, которая весит как пол-Юпитера, гораздо ближе к своей родительской звезде, чем Меркурий к Солнцу.

Масса обнаруженной планеты явно указывала: это газовый гигант (сложно было поверить в существование каменистых планет столь огромной массы). Но тот факт, что планета, принадлежащая тому же классу, что и Юпитер с Сатурном, находится совсем не там, где должна находиться, казался невероятным. Модель планетообразования, созданная во второй половине XX века, гласила: лишь в далеких от звезды областях пространства существуют условия для образования газовых гигантов, а следовательно, именно там они и могут быть расположены. Найти планету, похожую на Юпитер, так близко к звезде – все равно что наткнуться на тропический сад на Северном полюсе. Но между тем с цифрами спорить было сложно.

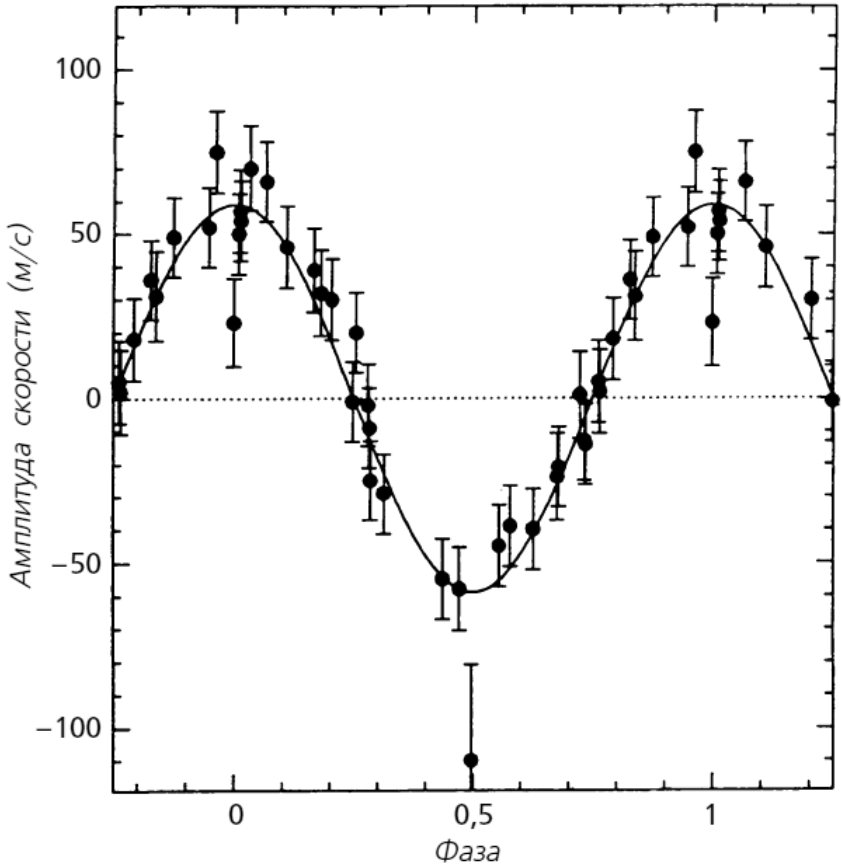


Рисунок 11. График колебания радиальной скорости 51 Пегаса *b* из оригинальной статьи Майора и Кело. Амплитуда колебаний около 60 м/с

После открытия Майор и Кело были осторожны с выводами и почти год хранили молчание. Слишком много за последнее время поступило сообщений об обнаруженных экзопланетах, и все они в итоге оказались ошибочными. В очередной раз смешить публику или поднимать шумиху в газетах не хотелось. Нужно было все тщательно перепроверить.

К 1995 году Майор и Кело провели еще серию наблюдений. Ошибки они все же не нашли – можно было публиковаться. И 23 ноября 1995 года в *Nature* появилась статья с описанием открытия за их авторством[54]. Впоследствии этой планете дали имя Димидий. За обнаружение первой планеты у солнцеподобной звезды Мишель Майор и Дидье Кело получили в 2019 году Нобелевскую премию. Нобелевский комитет не изменил себе – ученые ждали свою награду многие годы.

Планета у 51 Пегаса оказалась не единственным

исключением из «правил». Уже в 1996 году методом радиальных скоростей были открыты еще пять планет – и все они оказались газовыми гигантами на близких к своим звездам расстояниях. При таких расстояниях их газовые оболочки должны иметь температуру, измеряющуюся тысячами градусов. Астрофизики назвали этот класс планет «горячие юпитеры». Пройдут годы, закончится XX век, мы вступим в новое тысячелетие, и станет ясно, что в Галактике много таких планет.

Начиная с середины 90-х годов и до 2012 года доплеровская спектроскопия оставалась самым продуктивным способом обнаружения экзопланет. Три четверти из них имеют массу от 0,5 до 13 M_J. Более 40 % – это горячие юпитеры, и находятся они на меньшем расстоянии от своих звезд, чем Земля от Солнца, а их масса равна от 0,5 до 10 M_J.

Что же это значит? Огромное число планет в нашей галактике принадлежит к типу планет, который не встречается в Солнечной системе? Как такое возможно?

Глава 7. Транзитный метод и космические телескопы

– С кем это ты разговариваешь? – спросил котенка щенок, выходя из подъезда.

– С тенью, – ответил котенок.

– Разве тень умеет разговаривать?

– Не умеет, – сказал котенок. – Но она все понимает.

ГРИГОРИЙ ОСТЕР. ТЕНЬ ВСЕ ПОНИМАЕТ

То, что астрофизики повсюду находят горячие юпитеры, объясняется прежде всего так называемым эффектом наблюдательной селекции. Очень массивные и близкие к родительской звезде, горячие юпитеры вызывают колебание ее радиальной скорости выше порога чувствительности современных инструментов и поэтому могут быть зафиксированы. Короткие орбитальные периоды, от нескольких дней до нескольких месяцев, тоже способствуют обнаружению планет – будь периоды больше, например сопоставимыми с орбитальным периодом Юпитера (12 лет), колебания радиальной скорости наверняка остались бы незамеченными.

Горячие юпитеры стали лучшими целями для телескопов рубежа веков. Например, в 2011 году была открыта планета *WASP*-43 *b*[38], находящаяся на орбите с радиусом немногим больше двух миллионов километров от своей звезды (это примерно равно расстоянию от Земли до Луны, умноженному на 5,5). Год на этой планете длится всего 19 ч., масса составляет 1,8 M_J, а радиус на 10 % меньше радиуса Юпитера. Это одна из самых короткопериодических экзопланет среди известных нам на сегодня. Звезда *WASP*-43 принадлежит к классу оранжевых карликов – это маленькие и относительно легкие звездочки. Температура ее поверхности приблизительно равна 4 400 К (для сравнения: температура поверхности Солнца 5 700 К). Из-за того что звезда имеет не очень высокую температуру, температура верхних слоев *WASP*-43 *b* оказывается типичной для такого класса планет – примерно 1 000 К.

Сейчас, после того как астрономы собрали внушительную статистику по экзопланетам, оказалось, что горячие юпитеры достаточно редки в Галактике – их находят рядом всего с 1 % солнцеподобных звезд[55]. Ситуация с обилием горячих юпитеров изменилась, когда были обработаны результаты, переданные на Землю телескопом «Кеплер». Этот телескоп пробыл на орбите с 2009 по 2018 год. В последний для «Кеплера» год состоялся запуск еще одного космического телескопа – *TESS*. Оба телескопа используют транзитный метод обнаружения экзопланет – на сегодняшний день это самый эффективный метод.

Если вы знаете, что такое затмение, будьте уверены: что такое транзит, вы тоже знаете. «Затмение», «транзит» и «покрытие» – это разные слова для обозначения схожих явлений, происходящих, когда один астрономический объект проходит между наблюдателем и другим объектом (как правило, более далеким и более ярким). Разница между этими явлениями – в наблюдаемых размерах объектов. Если угловые размеры двух объектов сопоставимы, мы говорим о затмении одного объекта

другим – например, как в случае с солнечным затмением. Если видимый размер более далекого объекта оказывается намного меньше видимого размера более близкого, это явление называется покрытием. Постоянно происходят покрытия некоторых звезд Луной. Обратная ситуация называется транзитом: скажем, когда самолет пролетает на фоне Луны, он совершает транзит.

Транзиты исторически были важны в астрономии, так как позволяли находить расстояние между Солнцем и Землей. Впервые транзит Венеры по Солнцу собирался наблюдать Иоганн Кеплер. Но ему не удалось – он умер за шесть лет до этого события. Однако благодаря работам Кеплера транзит смог увидеть английский астроном Джереми Хоррокс в 1639 году. Наблюдал транзит Венеры по диску Солнца и Джеймс Кук в своем кругосветном путешествии. Последний транзит Венеры произошел в 2012 году.

Что касается других звезд, Отто Струве был, по-видимому, первым, кто предположил, что периодические временные падения яркости звезды могут свидетельствовать о наличии обращающейся вокруг нее планеты. Потребовалось почти 50 лет, чтобы подтвердить эту гипотезу. Первое успешное наблюдение транзита удалось провести только в самом конце XX века.

Есть две ключевые даты, касающиеся транзитного метода обнаружения внесолнечных планет: декабрь 1999 года, первое детектирование планеты *HD* 209458 *b* с помощью этого метода, и апрель 2009 года, когда в космос был отправлен охотник за экзопланетами «Кеплер», принесший в копилку человеческих знаний тысячи подтвержденных экзопланет за почти десять лет работы. Два этих события, произошедшие с перерывом в 10 лет, положили начало революции наших представлений о Галактике и о разнообразии внесолнечных миров.

HD 209458 *b* – газовый гигант в созвездии Пегаса (того самого, в котором был найден первый горячий юпитер), находящийся на расстоянии 159 св. лет от нас. Он совершает полный оборот вокруг своей звезды по орбите, диаметр которой равен примерно $^1/_8$ диаметра орбиты Меркурия, раз в 3,5 земных суток. Это типичный горячий юпитер с температурой атмосферы 1 000 К, вращающийся вокруг звезды, очень похожей на наше Солнце. Изначально экзопланета была обнаружена методом радиальных скоростей с помощью спектрографа *ELODIE*, но в том же году две команды, работающие независимо, – первая из Великобритании (Кембридж), вторая из США (Университет штата Теннесси) – решили попробовать подтвердить ее существование с помощью транзитного метода. Несмотря на все сложности,

ожидавшие ученых, они смогли наблюдать падение яркости *HD* 209458 примерно на 2 % каждые 3,5 суток. Две статьи об этом появились в одном и том же выпуске *The Astrophysical Journal* в декабре 1999 года[56, 57]. Таким образом, *HD* 209458 *b* в 2010-х годах стала самой изученной юпитероподобной экзопланетой. Она даже получила настоящее, нетипичное для экзопланет имя – Осирис.

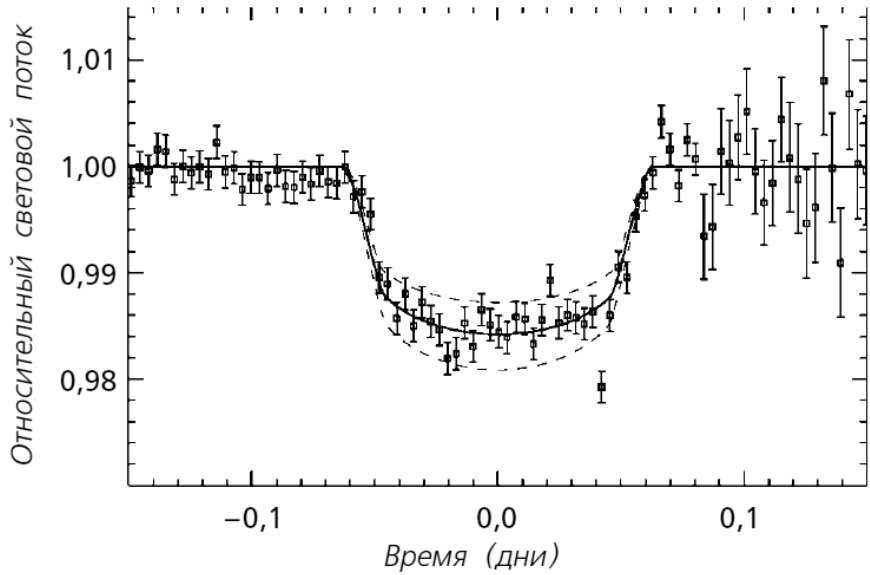


Рисунок 12. Кривая блеска звезды *HD* 209458, полученная командой Дэвида Шарбонно в 2000 году. Провал блеска обусловлен транзитом планеты по диску звезды

Тогда как метод радиальных скоростей позволяет оценить массу планеты, с помощью транзитного метода по величине падения яркости звезды можно рассчитать радиус планеты. Осирис стал первой экзопланетой, у которой вычислили радиус, он равен 1,35 R_J. Помимо этого, транзитный метод позволяет определить ориентацию орбиты планеты относительно наблюдателя с Земли. Если мы смотрим на планету из плоскости эклиптики, то для нас она проходит по самому экватору ее звезды. Но что, если мы смотрим на планету не из плоскости эклиптики? В этом случае чем выше (или ниже) мы находимся по отношению к этой плоскости, тем ниже (или выше) по диску звезды будет проходить для нас планета. Это продолжится до тех пор, пока мы совсем не перестанем видеть планету. Чем ближе орбита планеты проходит к экватору звезды, тем дольше она будет заслонять от нас некоторую часть звездного света и тем

длиннее будут транзиты. Сравнивая наблюдаемое время с рассчитанным на основе законов небесной механики, можно вычислить наклон орбиты планеты. Известная ориентация орбиты устраняет неточности в расчетах массы, сделанных с помощью метода радиальных скоростей. С учетом этих поправок масса Осириса равна 0,7 M_J. Такое комбинирование разных методов оказывается очень важным, поскольку точно измеренные масса и радиус планеты дают значение средней плотности, что является ключом к пониманию нового мира. Осирис стал не только первой планетой, обнаруженной транзитным методом, но и первой планетой, у которой определили плотность.

Зная плотность планеты, можно попытаться предсказать условия на ней. Скалистая Земля имеет плотность 5 500 кг/см^3, примерно такой же плотностью обладают Меркурий и Венера. Марс наименее плотный из всех планет земной группы: отношение массы к его объему равно 3 900 кг/см^3. Плотности газовых гигантов Юпитера, Урана и Нептуна примерно равны 1 500 кг/см^3, а плотность Сатурна составляет 70 % плотности воды. Осирис же имеет плотность 370 кг/см^3.

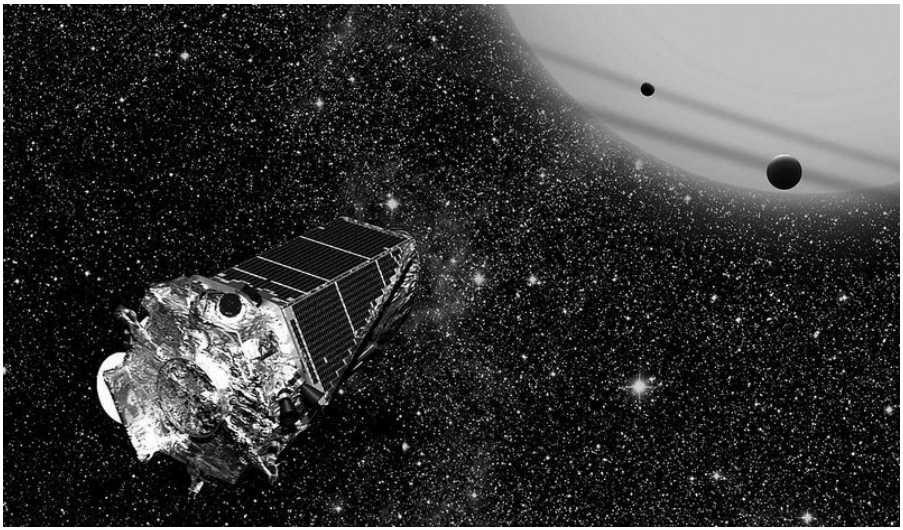
В силу близости к своей звезде средняя температура верхних слоев атмосферы Осириса равна 1 100 К, а разность температур на планете днем и ночью составляет примерно 500 К. Из-за этого атмосфера планеты раздувается настолько, что гравитация Осириса уже не может ее удержать, и вещество покидает верхние слои атмосферы со скоростью 100 000 т/с. Давление звездного излучения ускоряет отток газов и формирует кометоподобный хвост[58]. Планета как бы испаряется.

Температура атмосферы горячих юпитеров может быть еще больше. Планета *KELT*-9 *b*[39] – самый горячий из обнаруженных к настоящему времени горячих юпитеров. Сообщение об открытии этой планеты транзитным методом появилось в журнале *Nature* в 2017 году. Она вращается вокруг своей звезды, имеющей температуру 10 000 К, и находится от нее на расстоянии, равном всего лишь 0,1 от среднего расстояния между Меркурием и Солнцем, или 0,034 а. е. Высокая температура звезды *KELT*-9 нагревает атмосферу планеты до 4 300 К[59], что делает ее даже более горячей, чем некоторые звезды. Из-за этого *KELT*-9 *b* больше похожа на звезду *K*-типа, нежели на газового гиганта. Высокие температуры на дневной стороне планеты не позволяют образовываться молекулам. Возможно, какие-то простые вещества образовываются на ночной стороне, а ионы и атомы железа и титана формируют облака, из которых идут металлические дожди.

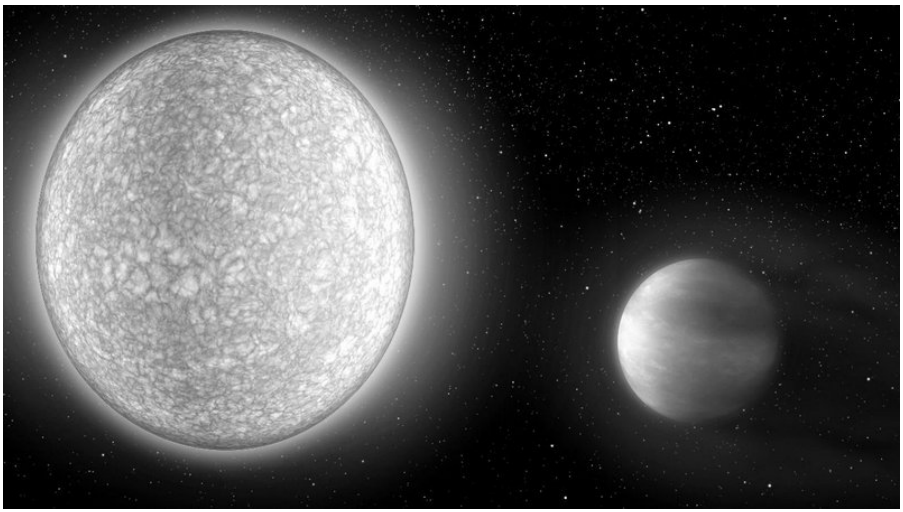
Звезда и ее планета обмениваются энергией через приливные

силы. Это те же самые силы, которые вызывают приливы на Земле и заставляют Луну поворачиваться к Земле лишь одной стороной. Эти же силы, судя по всему, ответственны за то, что *KELT*-9 *b* тоже повернута к родительской звезде только одной стороной, а ее орбита почти круговая. Масса *KELT*-9 *b* почти равна 3 M_J, а радиус ее водородной атмосферы близок к пределу Роша, после которого атмосфера уже не может существовать как единое целое, иначе она будет разрушена приливными силами. Вероятно, из-за этого *KELT*-9 *b* теряет атмосферу и за ней в пространстве, как и за Осирисом, словно за кометой, тянется хвост газа.

На конференции 30 октября 2018 года ученые *NASA* сообщили журналистам, что миссия телескопа «Кеплер» завершена, так как он исчерпал все запасы топлива, необходимые для периодической коррекции его положения в пространстве. К этому времени он отработал девять с половиной лет вместо положенных ему по спецификации трех с половиной. «Кеплер» обнаружил более двух с половиной тысяч экзопланет, и еще тысячи объектов, зафиксированных им, ждут проверки. Завершение миссии не стало сюрпризом. Еще в марте того же 2018 года было объявлено, что запасы топлива близки к истощению. К этому моменту два из четырех гироскопов, контролировавших положение телескопа в пространстве, вышли из строя. Последняя поломка произошла в мае 2013 года, и некоторое время «Кеплер» бездействовал, будучи неспособным ориентироваться в пространстве на должном уровне. Но инженеры *NASA* нашли уникальный выход из ситуации – то, что они сделали, можно назвать инженерным чудом: в 2015 году телескоп стабилизировали относительно солнечного ветра, оказывающего небольшое, но постоянное давление в одну сторону. А два оставшихся гироскопа устраняли неизбежный при таком положении дрейф. Так телескоп проработал еще три года. Операцию назвали «Второй свет» по аналогии с термином «первый свет».



1. Телескоп «Кеплер»



2. Сравнение размеров Осириса и Юпитера

3. Телескоп *TESS*

В апреле 2018 года на замену «Кеплеру» с космодрома на мысе Канаверал на ракете-носителе *Falcon* 9, принадлежащей частной компании *SpaceX*, в космос запустили другого охотника за экзопланетами – телескоп *TESS*. Он выполняет ту же задачу, которая стояла перед телескопом «Кеплер», и использует тот же метод, что использовал «Кеплер». Кроме того, оба телескопа имеют похожие размеры и массу, однако дальше начинаются различия.

Телескоп «Кеплер» обращался вокруг Солнца по чуть более высокой орбите, чем орбита Земли, и поэтому всегда находился в земной тени. В 2009 году наши знания об экзопланетах были очень скромны[40], и задача телескопа состояла лишь в том, чтобы следить за светом от как можно большего числа звезд, собирая статистику по типам и орбитам внесолнечных планет, которые удастся обнаружить. Ученые выбрали для наблюдения область пространства в созвездии Лебедя, что находится выше галактической плоскости. Тем самым камеры телескопа избегали засветки от центральной части нашей галактики, где плотность звезд наиболее высока. «Кеплер» следил за почти 145 000 звезд, находящихся на расстоянии до 3 000 св. лет от нас (это всего около 3 % диаметра Галактики). Число триллион, когда речь идет о количестве планет в нашей галактике, и классификация экзопланет по типам являются экстраполяцией знания, полученного из этой небольшой, но представительной выборки.

TESS же находится на вытянутой геоцентрической орбите,

которая к тому же наклонена к плоскости эклиптики. Вместо того чтобы смотреть лишь в одном направлении, телескоп сканирует почти весь небосвод с перекрывающимися полями зрения (подобно тому, как друг друга перекрывают лепестки цветка). Благодаря «Кеплеру» мы узнали, что планеты есть практически у каждой звезды, поэтому *TESS* ищет их у наиболее близких (до 300 св. лет) и ярких звезд. Каждые 27 суток телескоп переключается на новый сектор обзора северной или южной широты (всего их 26). В первый год работы составлялась карта неба северного полушария, во второй – южного. Участки неба, близкие к полюсу, наблюдаются дольше, чем 27 суток: некоторые – 54, некоторые – 81 и так далее. Зона полюса при таком режиме находится под постоянным наблюдением почти весь год. С одной стороны, это поможет обнаружить планеты, орбитальные периоды которых больше 27 суток, а с другой – потенциально полезно для будущей миссии телескопа «Джеймс Уэбб» (на момент написания этих строк многострадальный телескоп все еще находится на Земле) – ему тоже предстоит постоянно обозревать небо в полярной области.

В наследство от *TESS* мы получим каталог ближайших и самых ярких звезд с транзитными экзопланетами, окружающими Землю. Ожидается, что *TESS* обнаружит тысячи экзопланет, причем десятки или даже сотни из них будут размером с Землю. Эти планеты станут отличными объектами для подробных исследований в ближайшие десятилетия. Вообще, если голубая мечта человечества – найти жизнь во Вселенной, то обнаружение планет, максимально похожих на Землю, – первый шаг к ее осуществлению, и это одна из главных задач телескопа *TESS*. Он позволит не только находить экзопланеты и классифицировать их, но и изучать различия между планетами, принадлежащими к одному и тому же классу, определять состав их атмосфер, обнаруживать экзопланетные луны, следить за динамикой планет и оценивать их приливные взаимодействия.

Транзитный метод помог человечеству найти больше экзопланет, чем любой другой, однако, несмотря на простоту идеи, лежащей в его основе, астрофизики должны быть очень осторожны в его реализации, поскольку есть много аспектов, которые нужно учитывать, чтобы не совершить ошибку. Например, транзитный метод, как уже было сказано, позволяет вычислить наклон плоскости эклиптики к линии взгляда с Земли. Но диапазон углов, с которых планета может быть видна, небольшой. Планеты в системах, плоскости эклиптики которых имеют наклоны вне этого диапазона, просто не обнаружимы транзитным методом. Чем дальше планета находится от своей

звезды, тем меньше шанс ее заметить. Для инопланетян, наблюдающих нашу систему из случайного места во Вселенной, существует шанс в 0,76 % заметить прохождение Меркурия, 0,3 % – Земли, 0,031 % – Сатурна и 0,0098 % – Нептуна. Эти цифры приведены без учета размеров планет, которые, конечно же, вносят свои коррективы. Легче всего обнаружить крупные планеты. Телескоп «Кеплер», просто в силу своих технических характеристик, не смог бы зафиксировать ни одну планету размером с Меркурий или Марс около солнцеподобных звезд (возле красных карликов обнаружить несколько таких планет ему удалось, например *Kepler* 138 *b*). А для инопланетянина, изучающего Солнечную систему, даже транзит Венеры остался бы незамеченным, если бы этот инопланетянин использовал телескоп, по техническим характеристикам похожий на «Кеплер». Зато транзит Юпитера или Сатурна, который вызывает изменение яркости Солнца около 1 %, уже легко заметить. Возможно, инопланетянин бы посчитал, что возле нашего Солнца вращаются только газовые гиганты. С помощью *TESS* же Венера и Земля могли бы быть обнаружены.

Также в числе того, что может помешать обнаружить планету, просто недостаток времени. «Кеплер» изучал небо в течение девяти с половиной лет, а период обращения Сатурна вокруг Солнца, например, равен 29 годам. Чем дальше планета от своей звезды, тем больше этот период. «Кеплер» мог просто не заметить планету, год на которой больше, чем время его работы. Таким образом, транзитный метод более чувствителен к крупным и близким к звезде экзопланетам. Стоит ли удивляться, что мы до сих пор находим так много горячих юпитеров?

Если нам удается увидеть провал блеска звезды, то на самом деле и это не означает, что мы обнаружили экзопланету. Например, это может быть изменчивость блеска самой звезды или даже пятна на ее поверхности. Последние, являясь более холодными областями на звездах, светят менее ярко, чем окружающие их участки видимой звездной поверхности. У каждой звезды есть циклы активности: у Солнца один из самых важных циклов составляет 11 лет. И на его пике число солнечных пятен максимально. Далекий инопланетянин может принять такое большое темное пятно за планету.

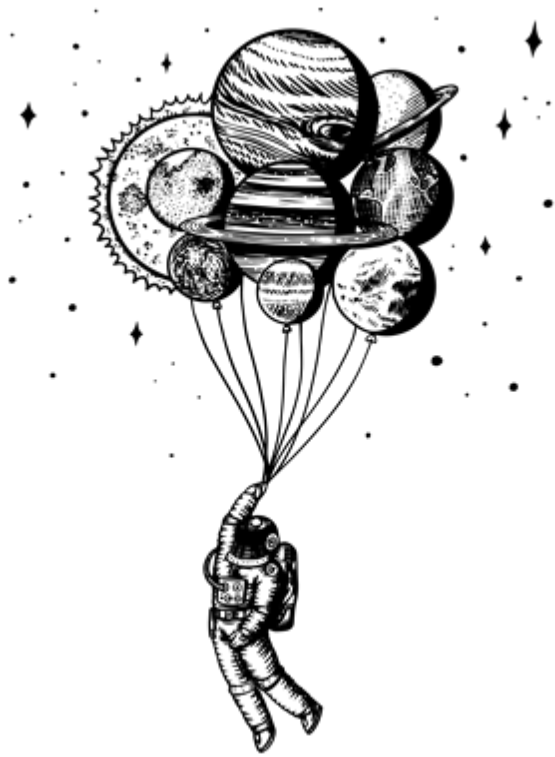
Среди причин ложного обнаружения экзопланет преобладают затмения в двойных звездных системах. Подобные ошибки связаны с разрешающей способностью телескопов. Когда одна звезда закрывает собой другую, приходящий поток света меньше, чем когда звезды ничем не перекрыты. Если же разрешающая способность телескопа не позволяет ему отличить две звезды от

одной, то он может принять двойную систему за транзит экзопланеты. Из всего этого становится понятно, что у транзитных телескопов имеется много возможных причин для ложного срабатывания, и поэтому нужна процедура верификации данных, обрабатывающая сигналы, исключающая неизбежные ошибки и уверенно подтверждающая или опровергающая существование экзопланет.

Звезда, в свете от которой наблюдается провал яркости, становится объектом интереса (обознается как *KOI, Kepler object of interest,* что значит «Объект интереса для телескопа “Кеплер”», и *TOI* для телескопа *TESS*). Потом начинается долгий процесс проверок. Сначала проводятся дополнительные наблюдения за звездой методом радиальных скоростей, сложные фотометрические процедуры. Это нужно, чтобы исключить возможность ложного срабатывания, различного рода помехи и двойные звездные системы. Если звезда успешно проходит этот этап, вероятная планета возле нее признается кандидатом в экзопланеты. Далее за дело берутся наземные телескопы. Сигнал от звезды еще раз проверяется, и теперь исключаются все возможные процессы, которые могли вызвать «проседание» блеска звезды. Наземные телескопы позволяют также следить за звездами многие годы, что важно при обнаружении долгопериодических планет. Наблюдения одного провала яркости звезды недостаточно для подтверждения существования планеты. Необходимо как минимум три регистрации транзита, чтобы говорить более уверенно. Для некоторых систем, особенно с предположительно маленькими планетами, где все методы дают большую погрешность, применяется статистический анализ. Он позволяет ответить на вопрос, какова вероятность того, что данный сигнал вызван экзопланетой.

Комбинируя транзитный метод и метод радиальных скоростей, мы можем узнать размер, массу и плотность экзопланеты. Еще более интересные данные о ней нам может дать анализ спектра поглощения ее атмосферы. Чтобы получить спектр поглощения атмосферы, нужно из спектра звезды, по диску которого проходит планета, вычесть спектр «голой» звезды, без планеты. Полученный спектр – ценное знание. Атмосфера экзопланеты меняет характеристики падающего на нее света звезды. Излучение с одними частотами поглощается атомами в атмосфере планеты, а с другими – переизлучается. Чем больше интенсивность конкретной линии поглощения в спектре, тем больше концентрация соответствующего элемента в атмосфере экзопланеты. Зная состав атмосферы, можно уже довольно точно определить климатические условия на поверхности планеты.

Сегодня, когда я пишу эти строки, находясь на пороге нового десятилетия, человечество приступает к следующему этапу изучения экзопланет. От поиска новых миров, от набора статистики мы переходим, собственно, к изучению. Нам интересно уже не столько найти новый мир, сколько понять, каков он, какие там природные условия. В космосе сейчас находится телескоп *CHEOPS*, который не открывает, а уточняет характеристики уже открытых экзопланет. Но самое главное, что в этом десятилетии с помощью новых космических аппаратов и наземных телескопов мы должны приступить к полномасштабному изучению атмосфер экзопланет. Возможно, уже через 10–15 лет нам удастся обнаружить на них явные признаки биологической активности. Это вдохновляет!



Глава 8. Марс и миграция планет

…Может быть, мы на Марсе, потому что мы должны быть здесь, потому что есть сильнейший кочевой импульс, встроенный в нас эволюцией. В конце концов, мы произошли от охотников-собирателей, и 99,9 % времени нашего существования мы были странниками. И еще одно место, куда можно отправиться, – Марс. Но какова бы ни была причина вашего пребывания на Марсе, я рад, что вы там. И я бы хотел быть с вами.

КАРЛ САГАН

В этой главе вас ждет путешествие на Марс. Лучшие условия для наблюдения Красной планеты создаются каждые 15–17 лет, когда происходят великие противостояния Марса. Противостояниями планет называют такие конфигурации небесных тел, при которых планета, Земля и Солнце выстраиваются в одну линию. Противостояние считается великим, если планеты выстраиваются в линию, находясь в своих перигелиях. В этом случае расстояние между планетами становится минимальным, а условия для наблюдения с Земли наилучшими. Одно из великих противостояний Марса пришлось на 1877 год. И именно его можно считать поворотным моментом в истории изучения Марса.

В тот год, наверное, все астрономы «заболели» этой Красной планетой. Мало какая обсерватория Земли не воспользовалась

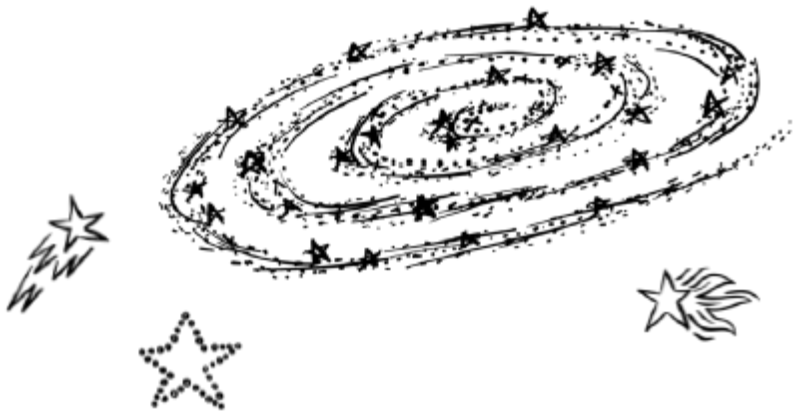
таким шансом для наблюдений Марса. И тогда же профессор Асаф Холл, направив свой 26-дюймовый (66 см) рефлектор на Марс, нашел вращающиеся около него два объекта[41], один из которых он назвал Фобос, а другой – Деймос (в переводе с греческого «страх» и «ужас», «смятение» соответственно). Так звали сыновей древнегреческого бога войны Ареса. Но наиболее примечателен 1877 год все же тем, что именно в этом году итальянский астроном Джованни Скиапарелли разглядел на поверхности Красной планеты сеть из таинственных темных линий – знаменитые марсианские каналы.

Он не знал, чем были эти линии. Если мы посмотрим на Марс в телескоп, с помощью которого вел свои наблюдения Скиапарелли, то планета предстанет перед нами красным дребезжащим пятнышком с темными и светлыми областями. Скиапарелли же утверждал, что в моменты, когда дребезжание атмосферы почти не наблюдалось, он видел, что поверхность Марса покрыта сетью прямых линий, которые назвал «канали» – «канавки», «каналы». Нужно отметить, что ученый писал о них довольно осторожно, не рассуждал об их происхождении и назначении и не делал громких заявлений. Однако мир жаждал чудес. После публикации его работ с легкой руки журналистов весть о каналах разлетелась по всему образованному миру. Его «канали» перестали принадлежать только ему, они пересекли океан и завладели умами астрономов Европы и Америки.

Следующие великие противостояния Марса произошли в 1892 и 1894 годах. Наблюдения в 1892-м ничего не дали. Но в 1894 году на авансцену вышел Персиваль Лоуэлл – путешественник и астроном-любитель60, Илон Маск XIX столетия. Лоуэлл родился в богатой семье и был наследником семейного бизнеса, но, видимо, посчитал путь коммерции слишком скучным для себя и решил избрать другой – полный открытий, надежд, но, естественно, и разочарований. Первую половину своей жизни он много путешествовал. Побывал четыре раза в Японии и Корее, изучил местные верования и увлекся эзотерикой, даже написал об этом несколько книг. В одном из путешествий по Японии он узнал об открытиях Скиапарелли. Из-за проблем со зрением итальянец к этому времени уже прекратил наблюдения за Марсом, и шумиха с каналами, казалось, должна была постепенно утихнуть, став очередной исторической легендой. Однако, может быть, именно тогда Лоуэлл понял, что это его шанс войти в историю. Он загорелся идеей пойти по следам Скиапарелли, тщательнее изучить марсианские каналы и представить человечеству доказательства существования внеземной цивилизации (если он и в самом деле обнаружит каналы).

В 1894 году Лоуэлл срочно вернулся из путешествия по Японии и начал строительство обсерватории для изучения Красной планеты. Не разделяя осторожности Скиапарелли о природе каналов, он еще до каких-либо наблюдений Марса, в ходе выступления в Бостонском научном обществе с докладом, посвященным созданию обсерватории, заявил, что линии служат несомненным результатом деятельности неких разумных существ. Выбирая место для обсерватории, Лоуэлл попросил совета у своего друга, известного астронома Уильяма Генри Пикеринга, который предположил, что самый устойчивый и чистый воздух на Северо-Американском континенте можно найти в пустынях на юго-западе США, в Аризоне. Лоуэлл воспользовался советом и начал строительство обсерватории вблизи городка Флагстафф на вершине холма, названного им *Mars Hill*. Сам того не подозревая, он стал основателем традиции создавать обсерватории в самых труднодоступных и не приспособленных для жизни местах. Место, предложенное Пикерингом, оказалось столь удачным, что в созданной Лоуэллом обсерватории по сей день проводятся наблюдения звездного неба.

Уже 1 июня 1894 года Лоуэлл со своими сотрудниками начал проводить наблюдения. В первую же ночь астрономов ждал успех. Это казалось невероятным, но каналы действительно были видны в телескоп! Охваченные энтузиазмом, исследователи ночи напролет наблюдали Марс, стараясь обнаружить все новые и новые детали. Астрономам из Флагстаффа удалось рассмотреть каналы в светлых и темных областях планеты, из чего они сделали вывод, что темные области являются не водоемами, как предполагали многие их современники, а твердыми безжизненными равнинами. Следовательно, на Марсе, должно быть, нехватка воды. В течение нескольких последующих месяцев ученые составляли подробную карту марсианских каналов. Выяснилось, что система каналов охватывает одну пятую поверхности всей планеты! Они, по мнению ученых, создавались в этой бескрайней пустыне, чтобы транспортировать воду из полярных областей в более засушливые экваториальные.



Лоуэлл упорно искал подтверждения того, что Марс похож на Землю и… находил их. Например, сотрудники обсерватории разглядели яркие светлые пятна на частях Марса, не освещенных Солнцем. Эти пятна они приняли за облака, что, в свою очередь, указывало на наличие атмосферы. Лоуэлл предположил, что Марс намного старше Земли, и жизнь, которая на нем есть, имеет более древнюю историю, а значит, делал вывод он, цивилизация разумных существ на этой планете появилась раньше цивилизации людей на Земле и поэтому, несомненно, более развита. Если землянам построить систему каналов, охватывающую всю планету, не под силу, то марсиане, как он думал, вполне могли бы справиться с этой задачей.

Впоследствии обнаружилось, что минимальная ширина каналов, увиденных Лоуэллом, составляла 16–32 км. Нехитрый расчет позволял сделать вывод: количество воды, которое они способны были переместить, превышало все запасы воды, что могли содержаться в полярных шапках Марса. Это не смутило Лоуэлла. Он заявил, что наблюдаемые им линии на самом деле участки растительности по берегам настоящих каналов, транспортирующих более разумное количество воды.

Трудно судить, почему Лоуэлл увидел каналы там, где, как мы знаем сегодня, их нет. Скорее всего, виной тому его слишком живое воображение вкупе со страстной убежденностью в своей правоте. Стоит отметить, что научным сообществом результаты его наблюдений воспринимались довольно скептически. Более того, сам Лоуэлл какое-то время сомневался в существовании каналов. В своих записях он отмечал: «Если их не существует, то это интересный оптико-психический факт». Позднее он отбросит сомнения и до самой смерти в 1916 году будет исследовать марсианские каналы и рисовать их подробные карты.

Перефразируя Бориса Акунина, представления Персиваля

Лоуэлла были, конечно же, плодом XIX столетия, когда литература была великой, вера в прогресс безграничной, а заблуждения имели изящество и вкус. Но профессиональные астрономы все же желали более серьезных доказательств, которых Лоуэлл предоставить не мог, имея в наличии довольно слабый телескоп. Идея развитой цивилизации на Марсе, не найдя отклика среди ученых начала XX столетия, перекочевала на страницы фантастических романов. Герберт Уэллс написал «Войну миров» спустя всего три года после начала исследований Лоуэлла, а Эдгар Райс Берроуз в 1912 году начал публиковать цикл рассказов о марсианских приключениях Джона Картера.

* * *

С тех пор прошло много лет. Современные астрофизики и астробиологи уже не ждут встречи с инопланетной цивилизацией на Красной планете, но их воображение все же не исключает возможность найти там внеземную жизнь. За исключением Земли, Марс – наиболее изученная планета Солнечной системы. Не считая Луны, это также единственное небесное тело, которое изучают с помощью передвижных планетоходов. Чем объясняется такой интерес наших современников к Марсу?

Во-первых, Марс все еще остается потенциально обитаемой планетой. Сейчас мы знаем, что на его поверхности микробной жизни нет, но до сих пор не найден ответ на вопрос, есть ли жизнь под поверхностью. Согласно многочисленным исследованиям, под грунтом Марса могли бы себя комфортно чувствовать даже земные микроорганизмы – некоторые виды экстремофилов. Данные, которые мы получаем с помощью научных приборов, установленных на орбитальных и спускаемых аппаратах и роверах, дают пока довольно противоречивые ответы. Это делает Марс приоритетной планетой для поиска жизни во Вселенной. В последних главах мы вернемся к вопросу о внеземной жизни в целом, как в Солнечной системе, так и за ее пределами, и к марсианской жизни в частности.

Во-вторых, как и Венера, Марс представляет собой мир, в котором когда-то что-то пошло не так[42]. Венера, Земля и Марс возникли в сравнительно узкой полосе околосолнечного пространства: от 0,7 до 1,5 а. е. Все три планеты в далеком прошлом имели не сильно отличающиеся друг от друга условия на поверхности, но потом с каждой из них случилось что-то, что превратило Венеру в филиал ада в Солнечной системе, Землю – в цветущий сад, а Марс – в холодную пустыню. И особенно

интересен, конечно, Марс: он больше всех был похож на юную Землю. Что же не позволило ему пойти по земному пути эволюции?

Космическими аппаратами Марс исследуется с 1964 года. Первым космическим аппаратом, севшим на Марсе, был советский спускаемый аппарат станции «Марс-3». Но, хоть и совершил удачную посадку, по неизвестным причинам он перестал работать всего через 14 секунд. В 1976 году произошло значимое событие: космические станции «Викинг-1» и «Викинг-2» совершили мягкую посадку на поверхность Красной планеты и впервые начали передавать оттуда научные данные и фотографии пейзажа. Обнаружить на Марсе зеленых человечков в 1976 году никто уже не рассчитывал. К этому времени состоялось несколько пролетных миссий и ряд спутников удалось вывести на орбиту вокруг Марса. Все это позволило осуществить картографирование его поверхности, измерить ее температуру и изучить состав атмосферы планеты. Стало понятно, что Марс – пустыня без признаков каких-либо живых существ и тем более цивилизаций.

Сейчас мы достаточно хорошо себе представляем условия на его поверхности. Атмосфера Марса очень разрежена – давление составляет примерно $^{1}/_{170}$ часть от давления на поверхности Земли. На 95 % атмосфера Марса состоит из углекислого газа, чуть менее 5 % делят азот и аргон, а оставшиеся тысячные доли процента – другие газы, включая водяной пар. На Марсе можно наблюдать практически все те же атмосферные явления, к которым мы привыкли на Земле, правда, их интенсивность в разы меньше. Спускаемые аппараты и марсоходы неоднократно отправляли на Землю фотографии дымки, тонких облаков из водяного пара и углекислого газа. В полярных областях может выпасть снег. Из-за того что на планете очень холодно (средняя температура там –60 °C), полноценный дождь не наблюдался ни разу, но часто бывают пылевые бури и вихри, случаются заморозки и выпадает иней из углекислого газа.

Уже миллиарды лет открытых водоемов с жидкой водой на Красной планете нет. Водяной лед содержится только в марсианских полярных шапках под слоем льда из углекислого газа и в грунте под поверхностью. Однако мы достоверно знаем, что когда-то на Марсе были океаны, реки и геотермальные источники. Их следы, высохшие русла рек, глины и другие вещества, которые могли образоваться только в присутствии жидкой воды, находят здесь повсеместно. Это означает, что температура и давление на Марсе вполне подходили и для живых существ. Но была ли там когда-нибудь развитая биосфера и осталась ли она до сих пор, спрятавшись в укромных уголках

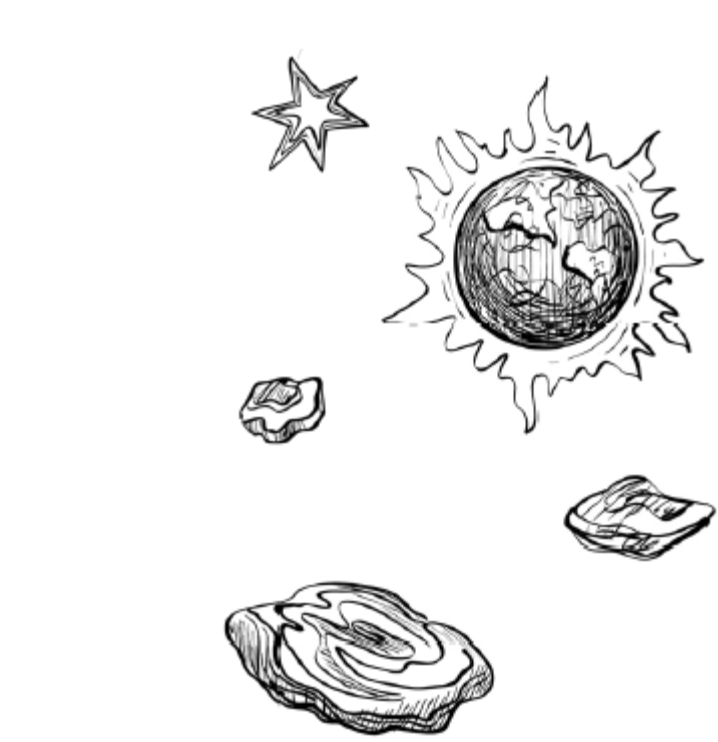
Красной планеты? Чтобы ответить на эти вопросы, исследователи Марса прилагают немало усилий, тратятся значительные государственные средства.

Так, в 2020 году стартовали две новые марсианские исследовательские программы: *NASA* запустило более совершенную версию *Curiosity – Perseverance*, с мини-вертолетом на борту, а Китайское национальное космическое управление – *Tianwen-1*, станцию, состоящую из орбитального аппарата и небольшого марсохода. В 2022 году к Марсу отправится марсоход «Розалинд Франклин» – это совместная миссия Европейского космического агентства и корпорации «Роскосмос» (ранее запуск планировался на 2020 год). Главная цель *Perseverance* и «Розалинд Франклин» состоит в поиске следов существования жизни на Красной планете в прошлом и настоящем. *Tianwen-1*, хоть это и не основная ее цель, тоже будет заниматься исследованием марсианского льда и грунта в поисках органических молекул.

Так в чем же причина некогда постигшей Марс катастрофы? Основная проблема – это отсутствие плотной атмосферы, обеспечивающей планету парниковым эффектом[43] и условиями, подходящими для привычной нам, жителям Земли, жизни. На раннем этапе существования Марса его атмосфера, очевидно, была сопоставима с земной – иначе не смогли бы образоваться жидкие водоемы. Причина потери значительной части атмосферы в некоторой степени кроется в массе Марса. При радиусе, равном 0,5 $R_{\oplus}$, она составляет всего $^{1}/_{10}$ $M_{\oplus}$. Вероятно, при такой массе гравитация, создаваемая планетой, оказалась не способна удержать массивную атмосферу, и та улетучилась. Еще одним фактором, влияющим на исчезновение плотной атмосферы, стало практически полное отсутствие у Марса магнитного поля. При своих размерах самостоятельно он может генерировать только очень слабое магнитное поле, в 500 раз слабее магнитного поля Земли. Будь у Марса более сильное магнитное поле, оно было бы способно поддерживать целостность его атмосферы.

Чтобы покинуть атмосферу планеты, скорость молекул должна быть больше (или равна) некой пороговой скорости, зависящей от массы планеты. Эту скорость называют второй космической. В любой атмосфере есть как нейтральные атомы, так и обладающие зарядом ионы. Нейтральные атомы никак не взаимодействуют с магнитным полем, и они действительно могут улететь в открытый космос в случае, если в результате столкновения с другими молекулами случайно приобретут ту самую вторую космическую скорость. Этот процесс называется диссипацией, но его влияние на атмосферу не очень велико, так как нейтральных частиц в верхних слоях атмосферы

меньшинство. С ионами ситуация другая. Магнитное поле взаимодействует с ними, поскольку ионы, в отличие от молекул, обладают электрическим зарядом, и возвращает большинство из них обратно в атмосферу. Обратите внимание: это происходит даже в том случае, если скорость ионов больше второй космической. У Марса магнитного поля нет, и под действием солнечного ветра его атмосфера беспрепятственно диссипирует вот уже миллиарды лет. Сегодня марсианская атмосфера истончается со скоростью около 9 т/сут.



Вопрос, почему Марс так мал, является одним из открытых в астрономии. Здравый смысл говорит, что планета должна быть больше. Логика здесь простая: чем дальше планета от своей звезды, тем меньше сила, с которой родительская звезда действует на планету, – следовательно, тем больше область пространства, в которой космические «булыжники» протопланетного диска вместо того, чтобы продолжать двигаться по орбите вокруг звезды, захватываются гравитацией планеты[44]. Таким образом, более далекая от Солнца планета легче аккумулирует и концентрирует вокруг себя вещество и быстрее растет, чем планета более близкая. Чем дальше планета находится от Солнца, тем больше должен быть ее размер. В

Солнечной системе это правило действует вплоть до Юпитера (Марс – исключение!). А начиная с Юпитера, размер планет уменьшается. И этому тоже есть объяснение. Выше я писал о предположении, что все планеты имеют доступ к одинаковому количеству вещества. Но это не так. Плотность вещества в протопланетном диске постепенно падает по мере удаления его от звезды, и отдаленным планетам просто не хватает материи в окружающем их пространстве, чтобы набрать массу. Так что размеры газовых гигантов за Юпитером вопросов у астрономов не вызывают.

Когда же дело касается массы Марса, нам не остается ничего, кроме как признать собственное невежество. Обычно первая мысль, которая возникает в связи с этим, состоит в том, чтобы попытаться компенсировать недостаток массы Марса материей из Главного пояса астероидов. К сожалению, ничего не получится. Масса всех астероидов, движущихся по орбитам в пространстве между Марсом и Юпитером, составляет около 0,5 % массы Земли. Это довольно мало. Летай Хан Соло на *Millennium Falcon* не через астероидное поле Хота, а через пояс астероидов Солнечной системы, он, скорее всего, не увидел бы в иллюминатор ни один объект. Даже когда мы проектируем космические аппараты для полетов к внешним планетам Солнечной системы, вероятность столкновения с астероидом никто не принимает хоть сколько-нибудь всерьез. Таким образом, малую массу Марса можно объяснить только малым количеством материала, которое имелось на орбите во времена формирования этой планеты. И единственная планета, которая может быть за это ответственна, – Юпитер. Но Юпитер находится достаточно далеко от Марса, чтобы оказать такое сильное влияние на процесс его формирования. В 2009 году вышла статья, где обсуждались начальные условия, при которых без привлечения неизвестной физики Марс мог получить современную величину своей массы[61]. Однако условия получились такими нереалистичными, что авторы вынуждены были заявить о необходимости искать другое объяснение. Впоследствии стало понятно, что его можно найти в, казалось бы, забытой гипотезе о миграции планет.

Еще с Античности люди привыкли думать, что орбиты планет всегда были неизменны. Однако сегодня мы должны пересмотреть эти представления. Гипотезу о том, что орбиты планет могут эволюционировать, по-видимому, впервые высказали еще Питер Голдрайх и Скотт Тремейн в статье 1980 года[62]. Эта статья поначалу казалась математическим курьезом. У себя дома, в Солнечной системе, мы не могли увидеть подтверждения изложенных там предположений. Но все

изменилось, когда 15 лет спустя произошло открытие горячих юпитеров, ключом для понимания которых стала планетарная миграция. С тех пор гипотеза о миграции была развита и расширена.

Миграция планет стала основной гипотезой, объясняющей формирование и строение планетных систем. О ней любят говорить как о факте, но на сегодняшний день никаких наблюдаемых доказательств миграции планет нет. Обратите на это внимание. Да, существование горячих юпитеров и строение Солнечной системы сложно объяснить, не прибегая к «помощи» миграций, однако астрономы находят самые разнообразные конфигурации орбит в экзопланетных системах, и не все эти конфигурации можно объяснить гипотезой о миграции.

Считается, что в основе миграции планет лежат три различных физических механизма. Эти механизмы могут осуществляться с большей или меньшей эффективностью в зависимости от массы планеты, плотности газа в диске, типа родительской звезды и других характеристик протопланетного диска. И вызваны они взаимодействием планеты с главными составляющими протопланетного диска: газом, планетезималями или другими уже сформировавшимися планетами, находящимися в непрерывном движении вокруг родительской звезды.

Первый из этих механизмов связан с влиянием газа на формирующуюся планету. Сегодня нам известно, что приливное взаимодействие планеты с окружающим ее газом может как тянуть ее внутрь диска, так и толкать наружу. Различают миграции I и II типов[45]. Миграции I типа подвержены относительно маломассивные планеты (от нескольких масс Земли до нескольких масс Нептуна). Находясь в диске, планета не меняет структуру протопланетного диска, но становится центром, на который аккрецирует газ из ближайших регионов диска. Аккрецирующий газ формирует две волны плотности: одна закручена из внешних областей диска, а другая из внутренних. Эти волны начинают воздействовать на планету приливными силами. Дисбаланс между приливными силами от этих двух волн заставляет планету или терять свой момент импульса и перемещаться внутрь системы, к своей родительской звезде, или же, наоборот, приобретать дополнительный момент импульса и перемещаться наружу.

Другой тип миграции, за который тоже отвечает газ, – миграция II типа – реализуется в случае с более массивными планетами (с массами, близкими к массе Юпитера). Поэтому чаще всего, если система включает только одну планету-гиганта, это происходит на более поздних этапах, чем миграция I типа.

При этом присутствие планеты существенно меняет структуру диска: обмен моментом импульса между диском и газом через спиральные волны плотности буквально расталкивает газ от планеты в разные стороны и формирует с обеих сторон от орбиты планеты кольцевой зазор. Планета оказывается заблокирована в кольцевом зазоре – как бы заморожена в нем, и ее миграция теперь связана с эволюцией протопланетного диска. В ближайших к звезде областях протопланетного диска, там, где потоки газа направлены к звезде, планета по спирали двигается внутрь системы, во внешних же областях, если диск расширяется, планета может мигрировать наружу. Это медленное, постепенное изменение орбиты, тогда как миграция I типа происходит довольно быстро. Считается, что по мере роста массы планеты миграция I типа может перейти в миграцию II типа.

Второй механизм орбитальной миграции вызван гравитационным взаимодействием планеты с планетезималями. Каждая из планетезималей, пролетая мимо планеты, передает ей часть своего импульса – планета получает своего рода микроскопический гравитационный «толчок». Когда масса всех планетезималей, находящихся в окрестности планеты, близка к массе самой планеты, такие «толчки», постоянно происходящие на протяжении десятков и сотен миллионов лет, способны до неузнаваемости изменить орбиту планеты[46].

А за третий механизм миграции ответственно приливное взаимодействие планет друг с другом. Наиболее сильное воздействие оказывают друг на друга близкие планеты. Как и в предыдущем случае, они тоже обмениваются между собой энергией, но их гравитационные «толчки» носят регулярный характер, а не хаотичный. Такая регулярность возникает, когда периоды обращения планет относятся друг к другу как целые числа. Резонансы могут как полностью дестабилизировать орбиты планет, так и позволить орбитальной конфигурации стать очень стабильной. В первом случае это приводит к взаимному отталкиванию планет: одна планета смещается ближе к родительской звезде, а другая – дальше от нее. Во втором случае движение планет может быть настолько устойчивым, что планеты, однажды попавшие в резонанс, будут находиться в нем неограниченно долго и даже мигрировать вместе в одном направлении.

Теперь давайте посмотрим, какую роль все эти механизмы сыграли при формировании Солнечной системы и как запустили процесс ее окончательной перестройки. Планеты-гиганты формируются быстрее, чем каменистые планеты. Через 3–5 миллионов лет после образования Солнечной системы масса

молодого Юпитера достигла того значения, при котором газ протопланетного диска заставил планету мигрировать внутрь Солнечной системы. Движение Юпитера, скорее всего, было обусловлено миграцией II типа, но вполне могло быть и так, что все начиналось с миграции I типа, а впоследствии ее сменила миграция II типа – конкретика здесь уже не так важна. Путешествие Юпитера и последствия, к которым это путешествие привело, описываются моделью смены галса (*Grand tack*)[63]. Первоначальное положение молодого Юпитера точно не установлено, но предполагается, что он сформировался недалеко от того места, где находится сейчас, около снеговой линии, в 3,5 а. е. от Солнца. За ним в это время аккумулировали газ и росли Сатурн, Уран и Нептун. Этот рост происходил гораздо медленнее, чем рост Юпитера, так как протопланетный диск по мере удаления от Солнца расширялся в продольном направлении, а концентрация газа в нем уменьшалась, и поэтому более далекие планеты получали меньше вещества для своего формирования.

Миграции Юпитера ничего не препятствовало – он мог бы продолжать двигаться к Солнцу до тех пор, пока оно не поглотило бы его, но что-то, как мы знаем сегодня, остановило его движение. Здесь в игру вступил Сатурн, который за это время уже успел нарастить массу и приблизиться к своим современным размерам. Он отправился вслед за Юпитером, и в этом случае мы имеем дело, скорее всего, с миграцией I типа. Хоть свое путешествие Сатурн начал позже, он, двигаясь быстрее Юпитера, успел нагнать старшего брата до того, как тот упал на Солнце (Юпитер к этому времени уже стал таким массивным, каким мы знаем его сегодня). Встреча двух планет-гигантов произошла через 100 000 лет после начала миграции Юпитера на расстоянии около 1,5 а. е. от Солнца – там, где сегодня лежит орбита Марса.

Хотя это значение в 1,5 а. е. весьма условное, оно позволило найти правильные значения радиусов орбит и масс Земли и Марса – планет, которым еще только суждено было родиться из пепла происходивших разрушений. Юпитер, словно гигантская метла, увлек за собой бóльшую часть твердого вещества между 2 и 5 а. е., очистив это пространство от крупных планетезималей и переместив их во внутренние части Солнечной системы на расстояние от 0,3 до 1,0 а. е.

Модель смены галса помогла найти элегантное решение двух серьезных проблем: с одной стороны, стало понятно, почему Марс получился таким крохотным, – всему виной недостаток твердого вещества на его орбите, а с другой – объяснилось большое количество воды и других летучих соединений на Земле и Венере – они родом из внешних областей диска. Считается также, что

планетезимали, которые «притащил» за собой Юпитер, уничтожили и выбросили из внутренних частей Солнечной системы каменистые планеты, которые безмятежно «росли» там все это время. Не будь этой миграции, Земля, возможно, была бы в несколько раз массивнее.

Итак, Сатурн нагнал Юпитер на расстоянии 1,5 а. е. от Солнца и остановился – движение вперед с той же скоростью было уже невозможно. Вращаясь вокруг Солнца и обмениваясь гравитационными «толчками», две планеты-гиганта вошли в орбитальный резонанс 2:3. Благодаря этому, как показывают результаты компьютерного моделирования, могло произойти настоящее чудо: пространство между Юпитером и Сатурном очистилось от газа и баланс приливных сил, вызванных волнами плотности газа, аккрецирующего на планеты, разрушился. Вместо того чтобы забрать момент импульса из системы сцепленных в орбитальном резонансе Юпитера и Сатурна, приливные силы начали передавать его системе – планеты перестали падать на Солнце и приступили к медленному движению в обратную сторону, во внешние части протопланетного диска. Нам невероятно повезло: именно масса Сатурна во многом определила этот этап миграции. Не обладай Сатурн достаточной массой, он бы просто не догнал Юпитер и тот сгорел бы на Солнце; будь же Сатурн массивнее, чем он есть сейчас, он бы мигрировал слишком быстро и не смог войти в резонанс с Юпитером – и они упали бы на Солнце вместе. Но масса Сатурна оказалась, что называется, в самый раз, и миграция Юпитера и Сатурна продолжалась до тех пор, пока газ протопланетного диска не рассеялся – еще около 500 000 лет.

Главный пояс астероидов расположен в кольцевой зоне на расстоянии 2,1–3,3 а. е. от Солнца. Считается, что он сформировался уже после того, как завершилась миграция Юпитера. Но между тем на него повлияли те катастрофические события. В первую очередь это очень вытянутые и экстремально наклоненные орбиты некоторых астероидов – их трудно объяснить без возмущающего действия Юпитера, что дважды пересекал эту область пространства. Важным следствием миграции Юпитера является и смешивание малых тел Солнечной системы, образовавшихся в разных частях протопланетного диска – именно это мы наблюдаем в Главном поясе астероидов, который включает в себя разные по составу (а следовательно, и по месту происхождения) тела. Есть еще ряд особенностей пояса астероида, которые предсказываются моделью смены галса. Движение Юпитера сначала к Солнцу, а потом от него может служить объяснением не только загадочных характеристик

внутренних планет Солнечной системы, но и хаотичного движения объектов в Главном поясе астероидов, структуры пояса Койпера и многого другого.

В Главном поясе астероидов, согласно стандартным представлениям о формировании планет, с течением времени количество каменных обломков должно убывать в силу того, что малые тела захватываются планетами или выбрасываются прочь из Солнечной системы. Поэтому ожидалось, что число ударных кратеров на поверхности планет будет тем меньше, чем моложе эти планеты. Однако согласно геологическим исследованиям, спустя около миллиарда лет после формирования Солнечной системы произошло нечто катастрофическое: на Меркурии, Луне и Марсе хорошо видны следы многократного увеличения количества столкновений с астероидами в период с 4,1 до 3,8 миллиарда лет назад. Это явление назвали поздней тяжелой бомбардировкой, чтобы отличать от бомбардировки астероидами на ранних этапах формирования планет. Логично предположить, что Земля тоже подверглась поздней бомбардировке, а за то, что мы не видим ее следы, ответственна эрозия.

Объяснения тяжелой бомбардировки, которое устраивало бы всех, до сих пор нет. Однако теперь к имевшимся гипотезам добавилась еще одна – модель Ниццы[64]. В рамках этой модели скачок числа бомбардировавших планеты астероидов находит свое объяснение. Модель Ниццы начинается с того момента, где заканчивается модель смены галса. Итак, двигаясь в орбитальном резонансе по направлению от Солнца, Юпитер и Сатурн со временем добрались до Урана и Нептуна (которые находились на более близких орбитах, чем сегодня). Гравитационное взаимодействие Юпитера и Сатурна захватило эти планеты, так что образовалась резонансная группа из четырех гигантских планет, которые начали вместе двигаться за пределы Солнечной системы. Это движение прекратилось, только когда протопланетный диск полностью рассеялся. Тем не менее возникшая конфигурация планет в долгосрочной перспективе оказалась неустойчивой. Влияние планетезималей с окраин Солнечной системы в течение сотен миллионов лет понемногу меняло движение планет-гигантов. Это происходило до тех пор, пока однажды одна из планет не вышла из орбитального резонанса, «растолкав» в разные стороны Юпитер и Сатурн и спровоцировав волну хаотичных возмущений по всей Солнечной системе. Предполагается, что Нептун и Уран меняли свои орбиты несколько раз, пока не пришли к тем, которые мы наблюдаем сегодня.

О деталях этих процессов рассуждать сложно – сегодня

рассматривается несколько возможных сценариев, и все они основываются на численном моделировании. Но в некоторых наиболее достоверных моделях дестабилизация диска приводит к тому, что малые тела Солнечной системы, будь то тела из пояса астероидов или пояса Койпера, сходят с устойчивых орбит и устремляются как внутрь системы, так и вовне ее, провоцируя позднюю тяжелую бомбардировку.

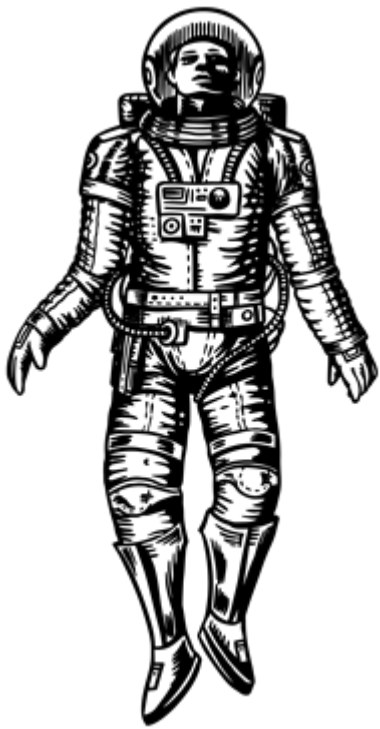
Помимо строения Солнечной системы, миграция планет позволяет объяснить феномен горячих юпитеров. Миграция газового гиганта к своей родительской звезде может не заканчиваться его уничтожением даже при отсутствии второго газового гиганта. На самом деле существует другой механизм, который приводит к остановке планеты, движущейся к своей звезде, – блокировка приливными силами, или спин-орбитальный резонанс. Он происходит, когда период вращения планеты вокруг своей оси совпадает с периодом ее обращения вокруг звезды. На практике это означает, что планета всегда обращена к звезде одной и той же стороной. Синхронизация орбитального и собственного вращения является энергетически выгодной для планеты, и поэтому при спин-орбитальном резонансе ее орбита устойчива к малым возмущениям. Для того чтобы сойти с нее, планете нужна дополнительная энергия. Приливная блокировка широко распространена в Солнечной системе. Самым наглядным ее примером служит вращение Луны вокруг Земли. Более того, большинство спутников планет приливно заблокированы своими центральными телами, в том числе Фобос и Деймос. Этот же механизм может остановить движение газового гиганта и оставить его на близкой к звезде орбите. Считается, что если не все, то подавляющая часть горячих юпитеров приливно заблокированы своими звездами.

Модели смены галса и Ниццы пришлись как раз кстати, списав все странности Солнечной системы на хаотичные процессы, происходившие в самом начале ее эволюции. Самая распространенная критика таких динамических моделей заключается в том, что детали протекания большинства описываемых процессов зависят от огромного числа неизвестных параметров, а следовательно, моделям не хватает предсказательной силы. Входные параметры можно произвольно корректировать до тех пор, пока они не создадут моделируемую Солнечную систему, которая будет выглядеть как реально существующая.

Странности Солнечной системы, породившие в том числе мнение о ее исключительности, можно объяснить и не прибегая к гипотезе о миграции. В некоторых симуляциях эволюции

протопланетного диска мы порой наблюдаем системы, похожие на нашу, но образовавшиеся без всякой миграции. Элизабет Бейли и Константин Батыгин в работе 2018 года предложили механизм формирования горячих юпитеров *in situ*, то есть там, где мы их наблюдаем[65]. И даже тяжелой бомбардировке был нанесен удар – в 2018 году в *Nature* вышла статья, подвергшая сомнению сам факт существования такого явления[66]. Но эти статьи пока что остаются лишь единичными случаями – большая часть научного астрономического сообщества уверена в существовании и поздней тяжелой бомбардировки, и процесса миграции планет.

Изучая формирование Солнечной системы, мы пытаемся понять, что случилось 4–5 миллиардов лет назад. Это как расследовать преступление, произошедшее в каменном веке. При всей силе современной науки мы не можем переместиться в прошлое и посмотреть, как же все было на самом деле. Наши знания оставляют слишком большое поле для фантазии, слишком много разных сценариев могло привести к той конфигурации планет, какую мы наблюдаем сегодня. Но все же главный урок, который мы должны вынести из этой истории, – планетные системы могут быть подвержены бóльшим изменениям с течением времени, чем считалось ранее.



Глава 9. Меркурий и металлические миры

Живопись требует небольшой тайны, некоторой неопределенности, некоторой фантазии. Когда вы вкладываете в картину совершенно ясное значение, людям становится скучно.

ЭДГАР ДЕГА

Меркурий никогда не был планетой, на которой ученые надеялись обнаружить инопланетян. Он относится к так называемой земной группе, то есть к планетам, по своим геохимическим характеристикам напоминающим Землю. Все

планеты земной группы имеют железоникелевое ядро, твердую кору, а между корой и ядром у них мантия, состоящая из силикатов. Я уже писал о причинах, по которым такие планеты должны быть сконцентрированы во внутренней части Солнечной системы.

Из-за близости к Солнцу Меркурий приливно заблокирован и находится в резонансе 3:2. Это означает, что он делает три оборота вокруг своей оси за то же время, что и два оборота вокруг Солнца. Меркурий – самая маленькая из планет Солнечной системы, и его орбита довольно сильно вытянута. Более малым размером и более вытянутой орбитой обладал только Плутон. Но после того как в 2006 году его «разжаловали» из планет, первое место в этих двух «номинациях» досталось Меркурию. И это создает ряд проблем для наших теорий планетообразования. Почему? Давайте разбираться.

Всего два космических аппарата – «Маринер-10» в 1973-м и «Мессенджер»[47] в 2011–2015 годах, оба отправлены *NASA*, – исследовали Меркурий. Первый облетел планету три раза и провел самые общие исследования: составил карту части поверхности, обнаружил магнитное поле, определил колебания температуры поверхности. Второй аппарат изучил Меркурий более детально, и по результатам его деятельности многие из наших представлений о Меркурии были признаны неверными.

На снимках, присланных «Маринером-10», ученые увидели поверхность, покрытую разломами, вызванными остыванием и сжиманием коры планеты; широкие гладкие равнины, оставленные потоками лавы; глубокие черные воронки на этих равнинах – следы взрывной вулканической деятельности. Это всё свидетельства интенсивных геологических метаморфоз в прошлом планеты. Обнаружение их стало неожиданностью, так как считалось, что к настоящему времени Меркурий уже остыл и представляет собой реликт, по сути гигантский кусок камня, а если его поверхность и меняется, то разве что из-за столкновений с астероидами. Полет «Мессенджера» заставил отказаться от этих представлений. Теперь мы знаем, что Меркурий до сих пор является геологически живым миром и его поверхность может эволюционировать[67].

Одним из главных открытий «Мессенджера» стали странные полости и впадины на поверхности Меркурия размером от нескольких десятков метров до полукилометра и глубиной 16–24 м. Они озадачивали. Проблема в том, что эти полости и впадины не могли появиться миллиарды лет назад, когда Меркурий был молод: за такой огромный промежуток времени они должны были бы совсем исчезнуть. К тому же у них слишком

острые края, что тоже говорит об их недавнем происхождении. Судя по всему, им всего несколько десятков миллионов лет – то есть по геологическим меркам они образовались буквально вчера. Но каким образом? Астрономы считают наиболее вероятным, что эти полости и впадины появились, когда летучие вещества покидали поверхность Меркурия, а грунт проваливался под собственным весом[68]. Этот процесс не мог завершиться слишком быстро, следовательно, он может продолжаться и сегодня.

Не менее неожиданным стало обнаружение на Меркурии льда в постоянно затененных кратерах[69]. Это обычный водяной лед с примесью органических веществ. Лед на Меркурии, где дневная температура достигает 400 °C? Звучит довольно абсурдно. Но он там есть! В укромных уголках полярных кратеров температура может опускаться до –200 °C – этого более чем достаточно, чтобы вода замерзла. Возможно, Меркурий – целая фабрика по производству льда![70] Например, рассматривается такой сценарий: солнечный ветер, взаимодействуя с минералами на поверхности Меркурия, способствует образованию молекул водорода и воды. Водород быстро покидает планету, а вода, перемещаясь по планете, оседает в полярных кратерах, где и предстает перед недоуменными взорами ученых.

Много шума наделали изображения кратера Дега, названного в честь французского импрессиониста. Кратер окрашен в странные темно-сине-фиолетовые тона, окружен острыми горами, а в его центре высится самая настоящая пирамида. Уфологи заговорили о следах инопланетян, но ученые, к сожалению, не поддержали их энтузиазм. О том, какое именно вещество вызвало столь необычный цвет кратера, ведутся дискуссии, но судя по тому, что сине-фиолетовые регионы встречаются на Меркурии довольно часто – таким цветом обладает не только кратер Дега, – этот оттенок вызван некой породой, в изобилии имеющейся в мантии и коре Меркурия. Что же касается пиков в центре ударных кратеров, их часто можно обнаружить на фотографиях Луны и поверхностей других каменистых тел. Эти пики образуются в результате «отскока» расплавленных горных пород во время резкого ударного сжатия, вызванного падением метеорита, а по мере увеличения размера кратера превращаются в кольцеобразные структуры[71].

Теперь заглянем вглубь Меркурия. Ядра планет земной группы состоят в основном из самых тяжелых металлов – железа и никеля. Благодаря «Месенджеру», измерившему микроскопические колебания сил тяжести на Меркурии и составившему гравитационную карту, стало возможным произвести расчет радиуса ядра Меркурия. Оказалось, что он

составляет почти 82 % от радиуса всей планеты[72] – это сравнимо по размеру с нашей Луной (радиус земного ядра, к примеру, составляет всего 45 % от радиуса Земли)! Огромное ядро Меркурия остается одной из самых главных его загадок. Как будто неизвестная и могучая сила когда-то давным-давно снесла всю мантию с этой планеты, оставив лишь прослойку из расплавленной породы между ядром и корой толщиной всего в 400 км – это почти в 13 раз тоньше земной мантии. В мантии Меркурия в значительно бóльшей концентрации, чем в мантиях других планет земной группы, содержатся такие элементы, как сера, калий и некоторые другие[73].

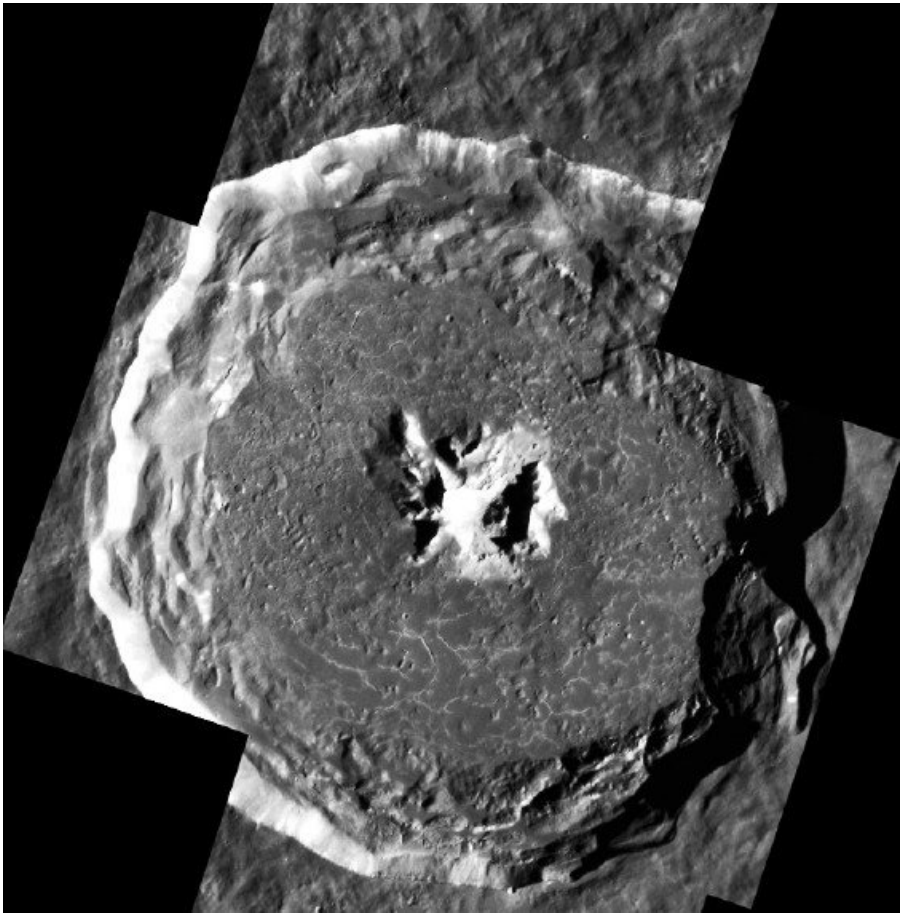


Рисунок 13. Кратер Дега

Очень вытянутая орбита, наличие летучих элементов в коре, особенности состава мантии, высокое содержание железа в составе планеты – все это говорит о драматической истории формирования Меркурия и дает благодатную почву для

всевозможных интерпретаций. Объяснение необычайно тонкой мантии Меркурия многие астрономы пытаются найти в различных вариантах гипотезы о мегаимпакте – столкновении с гигантской протопланетой[74]. Такой катаклизм действительно мог способствовать выбросу большей части меркурианской мантии в космос и обусловить наблюдаемые сегодня характеристики Меркурия. В ранней Солнечной системе столкновения протопланет должны были происходить часто, и в описанном сценарии на первый взгляд нет ничего удивительного. Но при более тщательном рассмотрении возникают вопросы.

Компьютерные моделирования столкновения Меркурия с протопланетой дают ограничения по массе и скорости тела-ударника. Если оно было слишком большим или двигалось слишком быстро, то Меркурий был бы разрушен полностью или выброшен за пределы Солнечной системы. Если же имело место столкновение с протопланетой, двигавшейся с не очень высокой относительной скоростью, это привело бы к тому, что бóльшая часть вещества ударника осталась бы на Меркурии, а бóльшая часть мантии планеты, выброшенная ударом в космос, смогла бы вернуться обратно на планету. Ни того ни другого мы не наблюдаем. Остается три различных сценария формирования современного Меркурия: лобовое столкновение или скользящий удар с протопланетой, имеющей приемлемое соотношение массы и скорости, или же множественные столкновения с небольшими телами. Но и эти варианты, вероятно, не соответствуют реальности. Первые два приводят к возникновению таких высоких температур, что все летучие вещества моментально испаряются из коры, а это, как мы знаем, не так; последний же вариант требует почти ювелирной точности метеоритной бомбардировки, что вряд ли возможно, учитывая ее самопроизвольный характер.

Что остается в итоге? Только предположить, что столь странное строение Меркурия является изначальным, сложившимся в результате вполне мирного процесса образования этой планеты. Подобные гипотезы были популярны в 1970–1980-х годах и подразумевают наличие довольно высоких температур в протопланетном диске в области формирования Меркурия – температур, при которых силикаты находились бы в расплавленном состоянии, тогда как железо, напротив, не подвергалось плавлению[75]; или же еще более высоких – таких, что оболочка Меркурия вообще испарилась бы, и ее остатки удалились вместе с газами протопланетного диска[76]. Но такие сценарии формирования Меркурия противоречат современным представлениям о распределении температуры в протосолнечной туманности и сегодня практически не рассматриваются учеными.

В итоге астрономы до сих пор не могут отдать предпочтение ни одной из гипотез о формировании Меркурия. Пытаясь найти разумное объяснение наблюдаемым свойствам планеты, они рассматривают и те версии, которыми ранее пренебрегали. Например, за удаление летучих веществ при относительно слабом столкновении Меркурия с протопланетой мог отвечать солнечный ветер, который тогда был намного сильнее, чем сегодня[77]. Найдутся ли у этой гипотезы доказательства, покажет время, но в любом случае мы должны заключить, что образование похожих на Меркурий планет, богатых тяжелыми элементами, требует очень необычных условий.

О планетах около других звезд мы знаем сегодня примерно столько же, сколько знали о планетах Солнечной системы до того, как к ним полетели космические аппараты. Каждый из них совершил множество открытий и не единожды перевернул наши представления о геологии и химии поверхностей исследованных им планет. Поэтому все, что нам остается сейчас, до того момента, как к экзопланетам полетят космические аппараты, – это строить более или менее правдоподобные гипотезы.

Перенесемся на 40 св. лет от Солнца, к двойной звезде, которую видно на ночном небе даже невооруженным глазом, – 55 Рака. Первый компаньон системы – солнцеподобная звезда 55 Рака *A*, вокруг нее по орбите радиусом 1 000 а. е. обращается ее компаньон – 55 Рака *B*, маленький красный карлик. Когда вы приблизитесь к системе, вы обнаружите, что вокруг 55 Рака *A* вращаются по крайней мере пять экзопланет.

Обеим звездам уже по 10 миллиардов лет, это означает, что они почти в два раза старше нашего Солнца. То, что 55 Рака видна невооруженным глазом, а также наличие такой большой планетной системы, сделало эту двойную звездную систему одной из самых наблюдаемых в нашей галактике. В 2015 году 55 Рака получила имя Коперник. (Это произошло благодаря тому, что Международный астрономический союз принял решение с 2014 года давать экзопланетам и их родительским звездам имена собственные.) Пять открытых планет, входящих в систему, были названы в честь знаменитых астрономов и изобретателей телескопа: Галилей, Браге, Хэрриот, Янсен и Липперсгей[48].

В 2004 году методом доплеровской спектроскопии была открыта 55 Рака *e* (позже ее назвали Янсен)[78] – ближайшая экзопланета к звезде 55 Рака *A*, и вот уже более 15 лет она приковывает к себе внимание астрофизиков. 55 Рака *e* являет собой отличный пример представителя семейства экзопланет с ультракоротким периодом. Год на Янсене длится меньше, чем земные сутки, – лишь 17 ч. и 41 мин., а радиус ее орбиты всего

0,015 а. е. Кроме того, эта экзопланета примечательна тем, что ее орбита почти на 80° наклонена к плоскости обращения других планет. Если вспомнить общий сценарий формирования планет из протопланетного облака, такой большой наклон орбиты – свидетельство каких-то масштабных катастроф, произошедших с планетой на ранних стадиях ее формирования. Интенсивные приливные силы, действовавшие на эту ближайшую к звезде планету, скорее всего, привели к тому, что она теперь всегда обращена к 55 Рака *A* одной стороной.

В 2011 году с помощью канадского космического аппарата *MOST* были зафиксированы транзиты Янсена по диску ее родительской звезды[79]. Используя данные транзитных исследований и метода доплеровской спектроскопии, астрономы вычислили радиус Янсена (2,2 $R_\oplus$) и его массу (почти 8,6 $M_\oplus$), благодаря чему смогли рассчитать и среднюю плотность экзопланеты – 6 600 кг/м^3.

Янсен – планета-загадка. За время ее изучения появилось несколько конкурирующих, противоречащих друг другу гипотез о том, что она собой представляет. Давайте их рассмотрим.

Для начала нужно понять, какие выводы можно сделать из значения средней плотности планеты. Посмотрим на более простые примеры модельных, полностью состоящих из одного вещества планет. Как меняется радиус этих планет при росте их массы? Ответ для некоторых веществ вы видите на рисунке 14.

Посмотрим на этот рисунок. Чтобы понять, какое вещество преобладает в составе планеты, зафиксируем массу Янсена (8,6 $M_\oplus$), начнем варьировать его состав и посмотрим, как меняется радиус. Если бы Янсен являлся железокремниевым миром, как Земля, то его радиус был бы меньше измеренного (точка, изображающая Янсен, лежала бы между кривыми *d* и *e*). Будь же Янсен, при той же массе, близок по составу к Нептуну, его радиус бы намного превышал измеренный (точка, изображающая Янсен, лежала бы выше кривой *a*, соответствующей планетам, полностью состоящим из воды). Получается, Янсен не похож ни на гигантскую Землю, ни на небольшой Нептун. Что же он собой представляет?

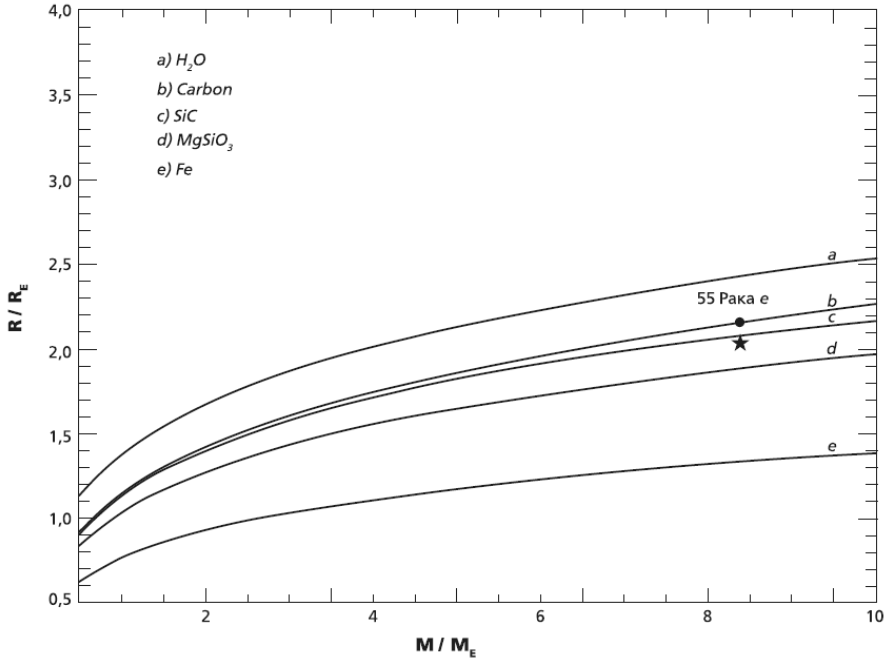


Рисунок 14. Соотношение массы и радиуса каменистых планет с однородным составом. Кривые показывают отношение массы к радиусу для планет однородного состава, указанного в легенде. Для 55 Рака e указаны два значения радиуса: звездочка соответствует радиусу, измеренному в видимом диапазоне, а точка – радиусу, полученному путем объединения измерений в видимом и инфракрасном диапазоне[80]

Первая мысль, которая может возникнуть, – Янсен является чем-то средним между планетой земного типа и газовым гигантом – этакое потерянное переходное звено. Универсальным методом подбора можно получить приемлемые значения радиуса твердого ядра планеты и атмосферы, чтобы итоговое значение плотности планеты соответствовало наблюдениям. Это могло бы спасти ситуацию, если бы не радиус орбиты Янсена. При такой близкой орбите излучение звезды испарило бы атмосферу в считанные миллионы лет.

Как же разгадать эту головоломку? Обратим наше внимание на родительскую звезду Янсена – 55 Рака *A*. Может быть, она подскажет нам правильный ответ? Ведь звезды и их планеты изначально формируются из одного газопылевого облака, а значит, они должны иметь сходный состав. Хотя бóльшая часть выброшенного при взрыве сверхновой вещества является водородом и гелием, в газовом облаке присутствуют более тяжелые элементы (астрофизики называют их металлами). Затем,

когда из этого вещества образуется новая звезда, концентрация металлов в ней повышена по сравнению со звездой предыдущего поколения.

Спектр 55 Рака говорит о повышенной концентрации углерода в ее составе (такой состав свойственен звездам четвертого поколения). Поэтому следует ожидать, что в составе планет, которые вращаются вокруг звезды, углерод тоже в избытке. На рисунке 14 точка, изображающая Янсен, весьма кстати лежит очень близко к углеродной кривой *b*. Получается, что модель углеродной планеты лучше всего подходит, чтобы объяснить наблюдаемые массу и радиус Янсена? Что говорят нам о ее пейзажах законы физики, химии, геологии? Я приглашаю вас в путешествие по этому миру!

Представьте себе бескрайнюю черную пустыню. Вдали видны черные зубы гор, под тонкой корой гигантской планеты бурлит магма, в небе висит огромное испепеляющее солнце. Черный песок пустыни – графит, одна из форм углерода, – моментально пачкает скафандр первого человека на этой планете – ваш. Температура на поверхности немногим уступает температуре в плавильной печи. Надеюсь, у вашего скафандра хорошая теплозащита. Янсен – это старая и очень массивная планета, она медленно остывала миллиарды лет, но до сих пор не остыла. В ее недрах течет не встречающийся на Земле расплавленный углерод. Очень вязкий, он медленно перемещает литосферные плиты, сталкивает их, а затем разводит. На Янсене медленно – намного медленнее, чем на Земле, – растут горы, хребты и цепи вулканов, извергающих в воздух кристаллизующиеся на лету алмазы. Возможно, вы уже успели заметить равнины, покрытые алмазами, когда пролетали на своем космическом корабле вокруг планеты[49].

Магнитное поле всегда возникает там, где есть движение проводящей среды. У геологически активной планеты, у которой есть железное ядро и под корой которой течет расплавленная магма, не может не возникнуть магнитное поле. Наличие магнитного поля – один из факторов, сделавших нашу планету пригодной для жизни: оно защищает нас от мощного солнечного ветра.

Предположим, что у Янсена есть и ядро, и жидкая магма. А значит, имеется и магнитное поле. Давайте пофантазируем, к каким последствиям может привести наличие сильного планетарного магнитного поля у Янсена. Оно выполняет две функции. Во-первых, сдерживает напор солнечного ветра, направляя потоки заряженных частиц вдоль силовых линий к полюсам планеты. Так возникают невероятные по красоте и

интенсивности полярные сияния. (Я использую слово «полярные» только для того, чтобы обозначить само явление – на Янсене эти сияния совсем не полярные. Поток звездного ветра так силен, что полярные сияния полыхают в атмосфере по всей планете, даже рядом с экватором – вы могли бы читать там эту книгу при естественном свете и ночью.) Во-вторых, магнитное поле поддерживает целостность атмосферы Янсена. В любой атмосфере есть как нейтральные атомы, так и обладающие зарядом ионы. Нейтральные атомы могут вырваться из оков земного притяжения и улететь в открытый космос только в том случае, если в результате столкновения с другими частицами они случайно приобретут вторую космическую скорость. С ионами ситуация иная. Магнитное поле не оказывает никакого влияния на нейтральные частицы, но взаимодействует с заряженными: оно препятствует убеганию заряженных частиц из атмосферы.

В 2016 году в журнале *Nature* вышла статья[81], в которой сообщалось о новых наблюдениях 55 Рака *e*, но уже в инфракрасном диапазоне. Астрономы с помощью телескопа «Спитцер» впервые в истории смогли получить температурный профиль экзопланеты. Наблюдения проводились в общей сложности 80 ч., и за это время на 55 Рака *e* прошло больше четырех лет.

Новые данные были получены не с помощью новой аппаратуры («Спитцер» отправился в космос еще в 2003 году), а благодаря более точной калибровке датчиков телескопа. Когда стоимость каждого проекта приближается к миллиарду долларов, приходится выжимать максимум даже из старых приборов. Результаты, которые получили ученые, озадачивают. Оказалось, что инфракрасное излучение «проседает» два раза за период: когда планета заслоняет от нас звезду и когда звезда заслоняет от нас планету. Более того, выяснилось, что самая горячая точка на дневной стороне поверхности планеты смещена от того места, где она должна быть, – прямо под звездой. Такое возможно, если на планете присутствуют собственные источники тепла! Так возникло предположение, что Янсен – лавовый мир. Также ученые вычислили суточную разницу температур – 1 400 К. Это значит, что поверхность планеты на дневной стороне представляет собой сплошь лавовые моря и реки. На ночной же стороне лава охлаждается и затвердевает. Но ставить точку в исследованиях было пока рано.

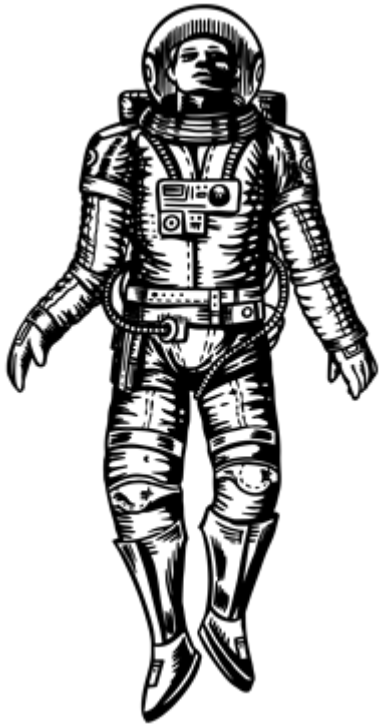
В 2017 году двое ученых из Лаборатории реактивного движения *NASA* снова обратились к тем же фотометрическим фазовым кривым, полученным телескопом «Спитцер», для более детального анализа[82] и перевернули все с ног на голову.

Используя улучшенные физические модели перераспределения тепла, они обнаружили, что температура ночной стороны 55 Рака *e* чуть выше, чем было установлено в предыдущем исследовании, а температура дневной чуть ниже. В итоге разница температур оказалась не такой большой – всего 900 К. Главный же вывод исследования состоял в том, что у планеты должна существовать атмосфера, обеспечивающая давление в 1,4 раза больше земного. И если атмосфера у Янсена действительно есть, то в ней преобладает азот или окись углерода с незначительными примесями других веществ, в том числе углекислого газа и воды (что делает атмосферу планеты немного похожей на земную, а также не исключает данные о составе атмосферы, полученные в 2012 году).

Однако исследование 2017 года привело ученых к новому парадоксу: с одной стороны, фотометрические фазовые кривые лучше всего объясняются наличием на планете атмосферы, а с другой – наши представления о мире говорят нам, что на таком расстоянии от звезды никакая сила не сможет удержать атмосферу возле планеты.

Как видите, наш взгляд на 55 Рака *e* постоянно меняется. На что похожа эта планета в действительности? На черную углеродную пустыню, лавовый ад или же на планету с плотной атмосферой? Янсен полон сюрпризов. Данные, которые будут получены в ходе новых исследований, вполне возможно, заставят нас вновь пересмотреть имеющиеся представления об этой экзопланете.

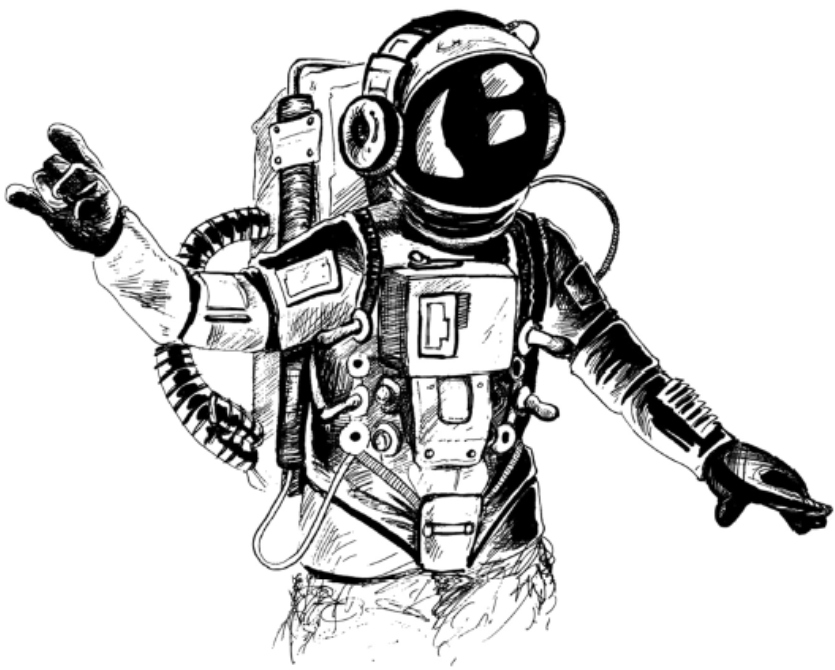
Меркурий и Янсен могут служить прекрасными примерами планет, в составе которых преобладает один из «металлов». Для Меркурия это железо, а для Янсена – углерод. Не исключено, что когда-то мы найдем планеты, в составе которых преобладает магний или натрий, сера или кальций. Нет никаких веских оснований предполагать, что таких планет не существует. Интересно, как выглядят их пейзажи?



Глава 10. Татуин и неразбериха с двойными системами

Снова и снова мы видим, что наука более странная и причудливая, чем вымысел.

ДЖОН НОЛЛ



Изучение экзопланет начиналось с самых парадоксальных открытий. Первые экзопланеты были найдены в 1992 году на орбите вокруг пульсара *PSR* 1257 + 12. Первой звездой солнечного типа, у которой обнаружили планету, стала 51 Пегаса. Попытки поиска экзопланет предпринимались и раньше. О революционных открытиях заявляли и Питер ван де Камп, охваченный фанатичной верой в существование экзопланеты у звезды Барнарда, и Гордон Уокер с Брюсом Кэмпбеллом, заявившие в 1988 году, что у двойной звезды Гамма Цефея есть компаньон планетарной массы. Доказательства, собранные ван де Кампом, не убедили астрономическое сообщество, а доказательства Уокера и Кэмпбелла в конечном счете не убедили самих Уокера и

Кэмпбелла[50].

Через 15 лет открытие Уокера и Кэмпбелла подтвердится и разрушится еще одно предубеждение – о невозможности существования экзопланет в двойных звездных системах. Гамма Цефея – это находящаяся на расстоянии всего 45 св. лет от Земли двойная звезда в созвездии Цефея. Первый компаньон системы – Гамма Цефея *A* – оранжевый субгигант в полтора раза массивнее Солнца, вторая звезда – Гамма Цефея *B* – красный карлик, вращающийся вокруг первой звезды по вытянутой орбите на расстоянии 22 а. е. (что немного больше, чем орбита Урана, 19 а. е.). Изучая эту систему, Уокер и Кэмпбелл получили кривую радиальной скорости Гаммы Цефея *A*. Они обнаружили, что эта кривая раскладывается на сумму двух синусоид: с первой все ясно – это долгопериодическое движение, обусловленное взаимодействием Гаммы Цефея *A* со своим звездным компаньоном, а вторая, соответствующая короткопериодическим колебаниям звезды, имела неизвестную природу. Уокер и Кэмпбелл решили, что лучшее объяснение для второй кривой – наличие планеты-гиганта на орбите вокруг Гаммы Цефея *A*. Но уже в 1992 году Уокер опубликовал статью-опровержение.

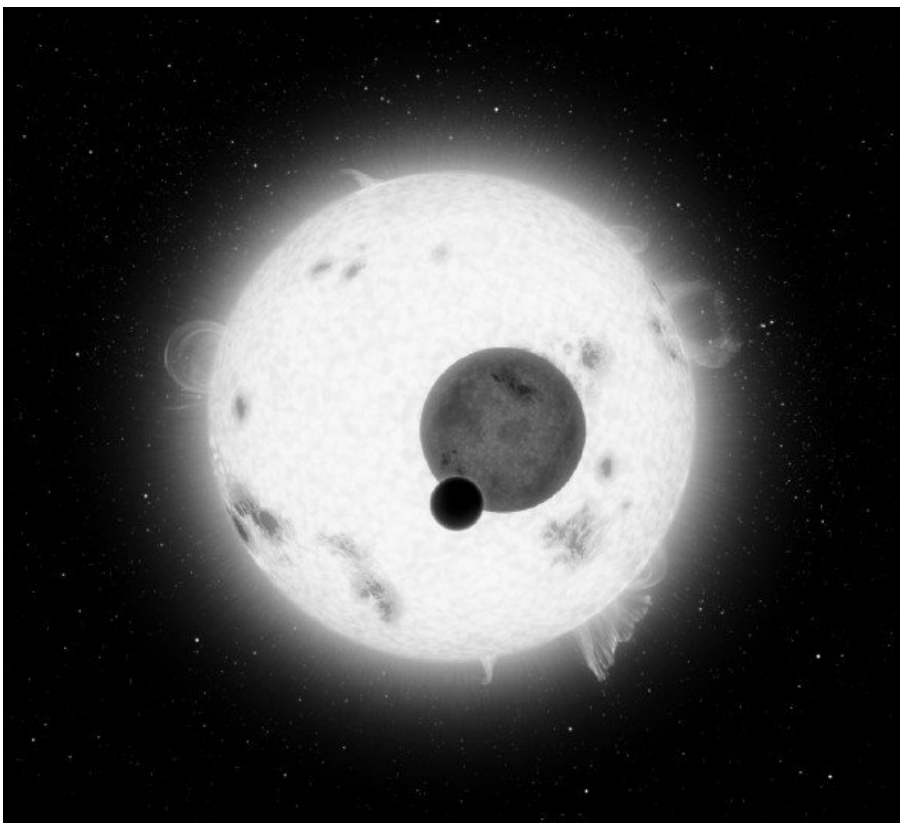


Рисунок 15. Система *Kepler*-16 в представлении художника

Наблюдения за двойной звездой продолжались. В 2003 году после обработки данных, собранных за 20 лет наблюдений Гаммы Цефея, Арти Хатзес с коллегами пришел к выводу, что у звезды действительно есть планета-спутник с периодом обращения 2,5 года. Этот компаньон оранжевого субгиганта как минимум в два раза массивнее, чем Юпитер, а большая полуось его орбиты в два раза больше радиуса орбиты Земли[83]. Будь у Уокера и Кэмпбелла больше статистики, планета Гамма Цефея *A b* стала бы первой обнаруженной экзопланетой, а сами ученые вошли бы в историю как первооткрыватели.

За годы поиска экопланет было совершенно множество открытий планет в двойных и даже тройных системах. Планеты в кратных системах (то есть состоящих из двух и более компонентов) находят часто, хоть и реже, чем у одиночных звезд. И в этом и заключается основной парадокс: согласно классической теории планетообразования, в кратных системах планет просто не может быть. Чтобы понять всю сложность проблемы, предлагаю сосредоточиться на процессах формирования планет в тесных двойных системах. Но для начала я немного расскажу о том, что это, собственно, за зверь такой – двойная звездная система.

Системы, состоящие из двух гравитационно связанных звезд, – частое явление в Галактике. На самом деле большинство звезд главной последовательности входят в кратные системы. Эти системы очень важны в астрофизике. Измерение периода обращения звезд друг относительно друга дает возможность найти их массу – одну из важнейших характеристик звезд. Кратные звезды формируются, когда протопланетный диск по каким-либо причинам распадается на два или больше фрагментов. Так как фрагментация диска может произойти по самым разным сценариям, конфигурации гравитационно связанных звезд получаются довольно интересными. Особенно красивы системы, состоящие из двух звезд с приблизительно равными массами. В этом случае две звезды, как в вальсе, кружатся вокруг центра масс системы, то сближаясь, то отдаляясь в пространстве. Иногда вокруг одной или обеих звезд вращаются еще звезды, и вокруг тех, в свою очередь, тоже могут вращаться звезды. К настоящему моменту известна только одна система, обладающая такой сложной тройной иерархией – состоящая из пяти звезд *Gliese* 644. Чаще звезды имеют двойную иерархию, порой сложную. Тут нельзя не вспомнить *BD* − 22º5866 – объект в созвездии Водолея, состоящий из двух пар звезд, вращающихся

друг относительно друга.

Чем сложнее кратные системы, тем реже они встречаются. Это связано с тем, что чем сложнее система, тем, как правило (но не всегда), легче ее разрушить. Орбиты в таких системах часто неустойчивы. Под устойчивостью орбиты здесь нужно понимать сохранение неизменными в течение больших промежутков времени основных характеристик орбиты (величины большой полуоси, эксцентриситета и наклона орбиты). Это условие возможно тогда, когда гравитационные возмущения от других тел малы и не оказывают особого влияния на орбитальное движение. Если же возмущения велики и характеристики орбиты быстро меняются непредсказуемым образом, то говорят, что орбитальное движение неустойчиво[51]. Возмущающие силы в нестабильной системе могут даже выталкивать тело из системы и приводить к его столкновению с другими телами.

В 1886 году математик и астроном Генрих Брунс доказал, что описание периодического движения трех взаимодействующих тел, в отличие от аналогичной задачи для двух тел, не имеет общего решения. Это означает, что кратная физическая система с числом компонентов больше двух должна обладать рядом специфических условий, чтобы долгое время оставаться устойчивой, а общую формулу для этих условий написать принципиально невозможно. Все, что остается с тех пор ученым, – искать частные решения.

Значительного прогресса в поиске стабильных траекторий трех тел, которые сколько угодно могут вращаться друг относительно друга, достигли в 2017 году китайские ученые, с помощью компьютерного моделирования обнаружившие сразу более 600 типов орбит[84]. Но решения, к которым они пришли, являются довольно экзотическими: трудно представить настолько сложные звездные орбиты. Чаще всего, если где-либо в Галактике образуется кратная система более чем из двух звезд, она состоит из звезд с сильно различающейся массой и имеет иерархическую структуру. Как вы помните, Галилей производил наблюдения двойной системы звезд Мицар и Алькор в созвездии Большой Медведицы для измерения их параллакса. Сегодня мы знаем, что Мицар является четырехкратной звездной системой, состоящей из двух пар звезд, вращающихся друг относительно друга, а Алькор – двойной звездой.

Но вернемся к экзопланетам. В этой главе я буду говорить в основном об экзопланетах в двойных звездных системах. Образование планет в системах большей кратности на качественном уровне происходит аналогично.

Сообщение об обнаружении планеты в двойной системе Гамма Цефея научное сообщество восприняло с долей

скептицизма. Астрофизики понимают, что околозвездные диски, в которых идут процессы формирования планет, у двойных звезд должны иметь более сложную структуру. В зависимости от расстояния между звездами эти диски могут формироваться возле каждой из звезд, только у одной из них или у обеих звезд сразу. Особый интерес, в силу относительной простоты, представляют двойные системы, расстояние между звездами в которых невелико настолько, что порой может происходить перетекание вещества с одной звезды на другую, и которые, вследствие своей компактности, имеют общую планетную систему, – их называют тесными двойными системами. Протопланетные диски вокруг таких систем практически аналогичны тем, что наблюдаются у одиночных звезд (за исключением небольшой внутренней области).

Чем двойная система опасна для протопланетного диска и формирования планет? Все дело в неоднородности ее гравитационного поля. Околозвездный газопылевой диск в молодой двойной системе стремится вытянуться вдоль оси, соединяющей обе звезды. Этот деформированный диск вращается вокруг центра масс системы быстрее, чем звезды-компаньоны вращаются друг относительно друга. Вечно отставая, звезды тормозят вращение близлежащего газа, скорость газа падает, и он аккрецирует на центр. Данное явление получило название «усечение протопланетного диска». Если протопланетный диск изначально маленький, он полностью разрушается системой, если же диск имеет бóльшую протяженность, то усечение затрагивает только внутренние его части, оставляя в относительном покое те, на которые звезды уже не оказывают деформирующего влияния. Таким образом, усечение протопланетного диска уменьшает запас времени для формирования планет, близких к звездам. К тому же чем меньше расстояние между звездами, тем горячее протопланетный диск и тем сложнее идут в нем процессы конденсации газа и роста пылевых частиц. Согласно данным, полученным с помощью телескопа «Спитцер», между одиночными и двойными звездами, расположенными на расстоянии от 10 а. е. друг от друга, нет никаких статистических различий в росте пылевых частиц на начальных этапах эволюции[85]. Однако в системах с бóльшим расстоянием между звездами орбиты планетезималей должны быть неустойчивы. И действительно, чем больше расстояние между звездами, тем реже в системе находят экзопланеты.

Любой анализ условий на поверхности экзопланеты начинается с выяснения параметров ее орбиты. Если планета находится в двойной системе, необходим анализ динамической

эволюции системы трех тел, что уже является весьма непростой задачей. В 1983 году Рудольф Дворак из Университета Вены предложил разделить всевозможные конфигурации устойчивых периодических орбит экзопланет на два типа: *S*-тип, если экзопланета вращается только вокруг одной звезды в двойной системе, и *P*-тип[52], если она вращается сразу вокруг обеих (во вселенной «Звездных войн» планета Татуин имеет орбиту *P*-типа).

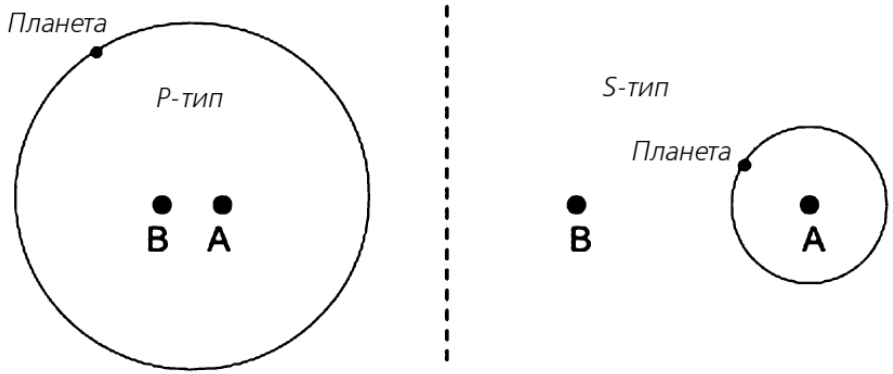


Рисунок 16. Схематичное изображение орбит *S*– и *P*-типов в двойных системах

Когда Джордж Лукас писал сценарии для первых фильмов своей культовой эпопеи, он, наверное, не мог и представить, что поколение, выросшее на приключениях Люка Скайуокера и Дарта Вейдера, однажды начнет искать в небе настоящий Татуин – ну или что-то очень напоминающее Татуин. Надежда, что поиски не напрасны, появилась в марте 2011 года, когда была обнаружена экзопланета *Kepler*-16 *b*.

Первые доказательства существования этой экзопланеты обнаружили доктор Лоранс Дойл и Роберт Славсон, изучая кривые звездного блеска, полученные с помощью телескопа «Кеплер»[86]. Двойная звезда *Kepler*-16 находится на расстоянии 200 св. лет от нас в созвездии Лебедя и состоит из двух звезд – оранжевого и красного карликов, разделенных всего лишь 0,22 а. е.

В двойной системе «проседания» блеска могут наблюдаться не только тогда, когда происходит транзит планеты по звезде, но и когда звезды в процессе взаимного вращения загораживают друг друга от наблюдателя на Земле. Если из кривой блеска звезды *Kepler*-16 вычесть хорошо детектируемые потускнения, вызванные взаимным перекрытием звезд, останутся еще провалы блеска, свидетельствующие о наличии третьего объекта в системе. Удивительными оставались две вещи. Во-первых, следы

транзитов третьего тела оказались непериодическими, а во-вторых, наблюдались разные изменения в суммарном блеске двойной звезды. Транзит по более крупному оранжевому карлику (первичный) вызвал падение блеска этой звезды на 1,7 %, в то время как вторичный транзит по красному карлику – на 0,01 %. Последовательность планетарных транзитов *Kepler*-16 всегда регистрировалась в следующем порядке: первичный – вторичный – вторичный – первичный – первичный – вторичный. Это стало уверенным доказательством существования объекта на орбите *P*-типа вокруг двух карликовых звезд.

Понять, является ли транзитный объект третьей звездой в системе или планетой, можно было бы, зная массу этого объекта. Фиксируя изменения в периодах обращения двух известных звезд друг относительно друга, Дойл и Славсон определили, что это тело весит почти как треть Юпитера и, следовательно, не может быть звездой. Ура! Экзопланета *Kepler*-16 *b* стала первым претендентом на то, чтобы считаться аналогом Татуина в нашей Вселенной. На пресс-конференции, посвященной открытию планеты, присутствовал Джон Нолл[53], который работал над несколькими эпизодами «Звездных войн», возглавляя отдел визуальных эффектов. Его слова по поводу совершенного открытия я сделал эпиграфом к этой главе, но, возможно, их стоило бы сделать эпиграфом ко всей книге: «Снова и снова мы видим, что наука более странная и причудливая, чем вымысел. Само существование обнаруженной планеты дает нам повод больше мечтать»[54].

Kepler-16 *b* находится недалеко от своих родительских звезд – большая полуось ее орбиты равна примерно 70 % расстояния от Солнца до Земли, что соответствует расстоянию, на котором в Солнечной системе находится Венера, а год на *Kepler*-16 *b* длится 229 земных суток. Если смотреть на звезды системы *Kepler*-16 с поверхности *Kepler*-16 *b*, то они будут сопоставимы по размеру с солнечным диском, видимым с Земли. Если на этой экзопланете есть жизнь, ее обитатели наверняка встречают захватывающие дух двойные рассветы и закаты, которых на Земле не увидеть никогда. Однако пришельцу с Земли на *Kepler*-16 *b* будет крайне некомфортно: средняя температура здесь –85 °C, а плотность планеты ненамного меньше плотности воды, и это, скорее всего, говорит о том, что *Kepler*-16 *b* состоит из каменно-ледяного ядра и обширной газовой атмосферы, что совсем не похоже на оригинальный Татуин.

Kepler-16 *b* таит в себе и еще одну загадку, которую нам до сих пор не удалось разгадать: судя по всему, существует некий механизм, стабилизирующий орбиту планеты, но до сих пор мы

не можем понять, что это за механизм и как он действует. Исходя из компьютерных расчетов, стабильные орбиты в том регионе, где движется *Kepler*-16 *b*, существовать просто не могут: их разрушат приливные силы центральных звезд. А ближайшая стабильная орбита имеет радиус в семь раз больший, чем радиус орбиты *Kepler*-16 *b*. Почему же тогда эта экзопланета не была выброшена из системы? Ответа на этот вопрос мы до сих пор не знаем.

После обнаружения планеты *Kepler*-16 *b* были открыты еще десятки планет, вращающихся вокруг двойных звезд. Система *Kepler*-47 стала первой обнаруженной многопланетной двойной звездой с тремя газовыми гигантами. Именно *Kepler*-47 доказала астрофизикам, что многопланетные двойные системы и правда существуют.

Еще одним примером странной системы служит *PSR B*1620 − 26. Эта двойная звезда состоит из довольно экзотических компаньонов: пульсара и белого карлика, разделенных расстоянием в 1 а. е. Что такое пульсары и чем они отличаются от нейтронных звезд, мы говорили в пятой главе. Белые карлики – это бывшие ядра звезд, которые медленно «доживают» свои дни, выделяя в пространство не энергию термоядерных реакций, а тепло, накопленное за то время, когда они были звездами главной последовательности[55]. *PSR B*1620 − 26 принадлежит шаровому скоплению в созвездии Скорпиона. Возраст скопления оценивается в 12 миллиардов лет. Все звезды в этом скоплении имеют примерно одинаковый возраст, и если возле какой-либо звезды в нем обнаруживается экзопланета, то и она оказывается такого же почтенного возраста.

В 1993 году методом радиальных скоростей в системе *PSR B*1620 − 26 нашли экзопланету *PSR B*1620 − 26 *b*, которую в силу возраста назвали «Мафусаил» – в честь библейского героя, прославившегося своим долголетием. Она находится на орбите *P*-типа с радиусом 23 а. е., имеет массу около 2 M_J и температуру поверхности около –200 ˚C. Гигантский и холодный газовый мир.

Но не это привлекло внимание ученых. Мы еще не знаем, каким образом экзопланета может пережить превращение своей родительской звезды в пульсар – взрыв сверхновой. Хотя в данном случае есть одна зацепка – место рождения системы Мафусаила. Сегодня большинство астрофизиков соглашается с тем, что наиболее вероятный механизм формирования *PSR B*1620 − 26 состоит в том, что звезда, впоследствии ставшая белым карликом, и планета были захвачены пульсаром, путешествовавшим в относительно тесном пространстве шарового скопления. Эта гипотеза выглядит правдоподобно. И если все действительно так и происходило, значит, планеты могут

путешествовать не только с орбиты на орбиту, но и от звезды к звезде, отправляясь в космические странствия, словно звездные корабли.

Изучая двойные системы, чаще всего ученые обнаруживают планеты, обращающиеся вокруг одной из звезд в кратной системе. Система Альфа Центавра – наш ближайший сосед. Она располагается всего в 4,3 а. е. от Солнца и является одной из самых ярких звездных систем на ночном небе. Альфа Центавра состоит из трех звезд. Первые две – это похожие на Солнце звезды, разделенные расстоянием в 11 а. е. Третий компаньон системы – красный карлик Проксима Центавра, он вращается вокруг общего центра масс по эллипсоидной орбите, большая полуось которой равна 9 000 а. е., и на данный момент является ближайшей к нам звездой. Пришельцы с Альфы Центавра не раз появлялись на страницах фантастических произведений. Трисоляриане, жители планеты, принадлежащей системе Альфа Центавра, играют главную роль в трилогии китайского фантаста Лю Цысиня «Память о прошлом Земли». Непредсказуемый, хаотичный мир, ввергающий своих обитателей то в огненный ад, то в невыносимую стужу, совершенно не похожий на стабильный земной, – наверное, это то, чего следует ожидать от климата на планетах в тройных системах. Но до последнего времени ничто не могло ограничить фантазию писателей. С 2012 года ситуация начала меняться.

Чилийская высокогорная пустыня Атакама уже не раз упоминалась в этой книге, так как она является одним из лучших мест на Земле для наблюдения ночного неба. На краю этой пустыни, недалеко от города Сантьяго, расположена европейская обсерватория Ла-Силья, 3,6-метровый телескоп которой оснащен высокоточным спектрографом *HARPS*. В 2012 году международная команда астрономов с помощью *HARPS* провела анализ радиальных скоростей системы Альфа Центавра. Полученные практически на грани возможностей спектрографа данные позволили ученым выдвинуть гипотезу о существовании планеты земного типа на близкой орбите у одной из солнцеподобных звезд в этой системе – Альфы Центавра *B*[87]. Планета, правда, совсем не походила на ту, на которую хотелось бы переселиться. Температура ее поверхности, согласно расчетам, должна была составлять более 1 000 ˚C! Научное сообщество и СМИ встретили открытие с большим воодушевлением. Прошло три года. Более тщательный анализ, проведенный британскими учеными в Оксфорде, позволил установить, что свидетельства существования планеты, полученные ранее, объясняются, вероятнее всего, ошибками в анализе данных, и никакой планеты у Альфы Центавра *B* нет[88]. Желанное открытие пришлось

признать несостоявшимся. Но на этом поиск планет в ближайшей к нам системе не закончился.

В 2016 году с помощью того же спектрографа *HARPS* удалось зарегистрировать планету у Проксимы Центавра[89]. Проксима Центавра *b* имеет массу как минимум в 1,3 $M_{\oplus}$[56], ее год длится всего чуть более 11 земных суток, а большая полуось ее орбиты равняется 0,05 а. е. – как и в случае со многими красными карликами, орбита экзопланеты намного меньше, чем орбита Меркурия. Удивителен также еще один факт: температурные условия на Проксиме Центавра *b* таковы, что при наличии плотной атмосферы на этой экзопланете может быть вода!

Когда мы слышим слова «жидкая вода на поверхности далекой планеты», то тотчас становимся немного астробиологами и начинаем думать о возможности существования жизни на этой планете. Новость о потенциальной обитаемости Проксимы Центавра *b* в СМИ восприняли восторженно. Ведь ближайшей к нам экзопланетой оказался не лавовый мир, а вполне пригодная для жизни планета! Астрофизики в свою очередь отнеслись более сдержанно. Дело в том, что красные карлики – очень активные звезды. Например, в марте 2017 года произошла вспышка Проксимы Центавра, энергия которой в 1 000 раз превосходила энергию всех прошлых событий. Так что даже если бы когда-нибудь у Проксимы Центавра *b* была атмосфера, она, по-видимому, давно была бы снесена подобными вспышками ее родительской звезды.

В завершении этой главы хочется поговорить еще об одной звездной системе. *HD* 131399 *A* – самая яркая звезда в тройной системе в созвездии Центавра, а также она в два раза массивнее Солнца. Две другие звезды – желтый и красный карлики, которые вращаются друг относительно друга и одновременно вокруг *HD* 131399 *A*. Такого рода тройные системы встречаются относительно часто, но что делает интересной именно *HD* 131399, так это наличие на орбите вокруг *HD* 131399 *A* планеты. Газовый гигант *HD* 131399 *A b* массой 4 M_J, двигающийся по орбите радиусом около 80 а. е., был открыт с помощью *Very Large Telescope* («Очень большой телескоп»), или *VLT*, в 2015 году. Как эта экзопланета могла образоваться и выжить, до сих пор остается загадкой. Галактика умеет удивлять.

Открытие *HD* 131399 *A b* было совершено чрезвычайно трудоемким, но очень эффективным методом, который мы пока не обсуждали подробно, – прямым наблюдением. Как я уже говорил, экзопланеты сложно рассмотреть в телескоп, так как они очень тусклые на фоне своих родительских звезд. Но если экзопланета находится на большом расстоянии от своей звезды и

при этом достаточно горяча, то, в принципе, ее можно обнаружить. Наблюдения таких планет ведутся в инфракрасном диапазоне, чтобы увидеть тепловое излучение от планеты, при этом свет от самой звезды блокируется диафрагмой (телескопы, с помощью которых можно проводить такие наблюдения, называются коронографами). На рисунке 17 вы можете увидеть в буквальном смысле фотографии системы *HD* 131399 и принадлежащей ей экзопланеты.

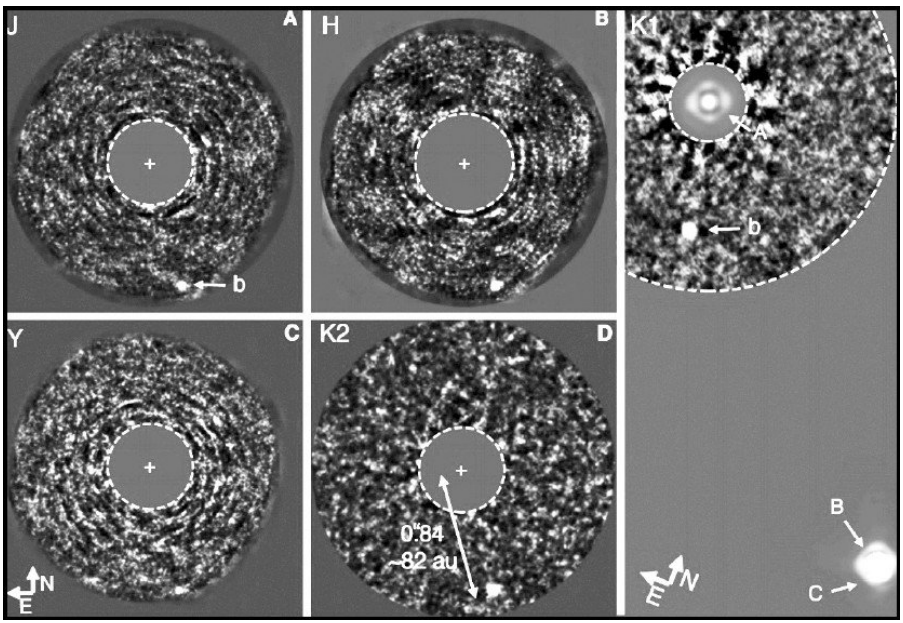
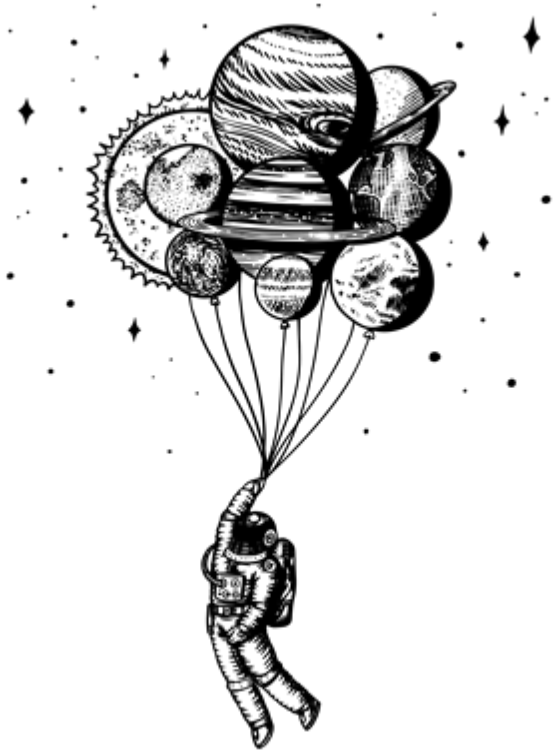


Рисунок 17. Система *HD* 131399. Видно движение планеты *HD* 131399 *A b*

На *HD* 131399 *A b* каждый день в течение первой половины года (который длится здесь почти 550 земных лет) можно наблюдать три восхода и три заката. Из-за того, что величина суток на этой планете, как и на Земле, непостоянна, раз в год случается день, когда восход одного светила совпадает с закатом двух других. Начиная с этого момента на *HD* 131399 *A b* до конца года будет вечный день. Этот день скорее напоминает сумерки: три солнца системы *HD* 131399 с поверхности планеты выглядят всего лишь как необычно яркие звезды.

Тройные системы – это не предел. Мы уже говорили, что в Галактике встречаются четырех-, пяти– и даже шестикратные звездные системы с различной иерархической структурой. Чем сложнее система, тем сложнее в ней образоваться планете. Но чем дольше мы изучаем экзопланеты, тем менее прочной становится наша уверенность в том, что чего-то просто не может быть.

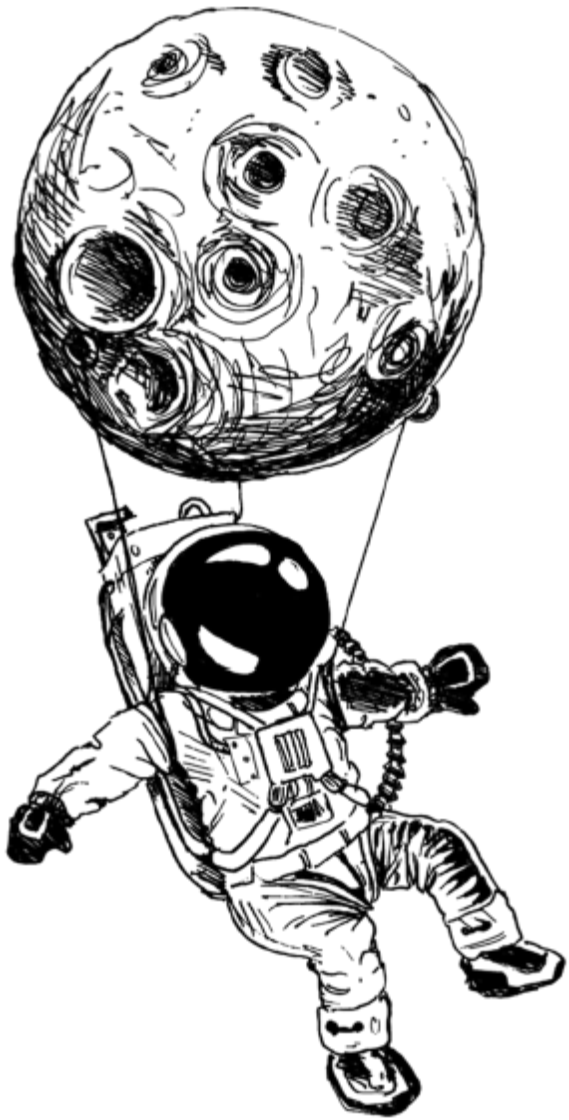
Ученые, еще не так давно утверждавшие, что в двойной системе не может быть планет, сейчас строят гипотезы, объясняющие формирование планет в системах любой кратности.



Глава 11. Гершель и спутники планет-гигантов

Сложилось мнение, будто счастливый случай привел эту звезду в поле зрения моего телескопа. Это очевидная ошибка.

УИЛЬЯМ ГЕРШЕЛЬ



Имя Уильяма Гершеля уже встречалось вам на страницах этой книги[57]. Он стал известен миру как один из лучших астрономов-наблюдателей всех времен и человек, который в 1781 году обнаружил Уран, что стало первым открытием планеты со времен Античности. Но в нашем рассказе важно не это, а другое, менее знаменитое открытие Гершеля: обнаружение спутника Сатурна – Энцелада. В этой главе мы вернемся в Солнечную систему и поговорим о некоторых, пожалуй самых интересных, спутниках планет. Это позволит нам посмотреть на экзопланеты с новой, неожиданной точки зрения.

Уильям Гершель родился 15 ноября 1738 года в Ганновере в семье садовника, ставшего военным музыкантом, Исаака Гершеля и неграмотной деревенской девушки Анны Ильзы Морицен. Свой путь он начал с армейской службы, присоединившись в качестве гобоиста к ганноверской гвардии в 1753 году. Через три года началась Семилетняя война, и Гершель, быстро поняв, что военная служба не для него, вместе с братом Якобом отправился в Англию. Вместо военной карьеры в ближайшие годы Гершель посвятил себя музыке, что обеспечило ему безбедную, хоть и довольно напряженную жизнь. Он сочинил много музыкальных произведений и в конце концов добился признания своего музыкального таланта. В возрасте 28 лет Гершель принял приглашение стать органистом в часовне города Бат на западе Англии. Он мог бы сделать успешную карьеру музыканта, если бы однажды ему на глаза не попалась книга о телескопах и о том, что в них можно увидеть. Новая наука сразу очаровала его. Так на свете появился Гершель-астроном.

В 1772 году Гершель отправился на родину и уговорил мать отпустить с ним в Бат его младшую сестру Кэролайн, чтобы она выступала вместе с ним на концертах.

Вскоре Гершель стал буквально одержим астрономией, он посвящал ей все свое время и тратил все деньги на новые телескопы. Понимая, что денег все равно не хватает, Гершель задумал создать собственный телескоп. В ту эпоху зеркала больших телескопов изготавливались не из стекла, а из бронзы – сплава меди с оловом. Процесс ручной полировки одного такого зеркала занимал у Гершеля по 14–16 часов непрерывной работы, бывали дни, когда он проводил за полировочным станком по 30 часов подряд. Но Гершель работал без устали. В результате он преуспел настолько, что в 1778 году сконструировал лучший телескоп своего времени – 7-футовый рефлектор[58].

Первым страстным увлечением Гершеля стали галактические туманности, о природе которых в то время ходило много

домыслов. Он даже якобы увидел, как меняются контуры таких туманностей. Также астроном безуспешно искал следы присутствия цивилизации на Луне, а не найдя их, начал измерять высоту лунных гор по отбрасываемым ими теням. Постепенно Гершель обзаводился знакомствами с людьми, занимавшимися, как и он, наукой. После встречи с королевским астрономом Невилом Маскелином он переключился на поиск двойных звезд. В первую же ночь наблюдений Гершель обнаружил, что Полярная звезда на самом деле двойная.

Со времен Античности и до Гершеля астрономы были сосредоточены на изучении движения Солнца, шести известных планет и их спутников. А звезды рассматривались как фон, пейзаж, на котором разыгрывается вечная драма. Гершеля же с самого начала привлекали именно звезды: он увидел в них живую, как сказали бы наши современники, эволюционирующую структуру. Он методично, звезда за звездой, исследовал небо. К концу 1781 года в его журнале для наблюдений было отмечено 269 двойных звезд. Телескоп Гершеля оказался так хорош, что даже английское научное сообщество не смогло проверить на своих телескопах утверждение этого астронома-самоучки о Полярной звезде.

13 марта 1781 года внимание Гершеля привлек один объект, который, на его опытный взгляд, не был похож на все остальные звезды. Через четыре дня астроном снова посмотрел на него и увидел, что тот изменил свое положение относительно других звезд. Гершель понял: так может вести себя только нечто, находящееся внутри Солнечной системы. Он предположил, что открыл новую планету, и, написав об этом статью, отправил ее Лондонскому королевскому обществу. Для определения орбиты объекта математикам потребовалось время, в течение которого одни астрономы верили, что Гершель наткнулся на новую комету, а другие, в том числе Маскелин, – что это действительно новая планета. Вторые оказались правы: неизвестный музыкант из Бата, «выскочка-астроном» смог разглядеть то, что за столько лет не увидел весь мир. В ноябре Гершеля наградили медалью Копли, а еще через месяц избрали членом Королевского общества.

Вот что написал Гершель о своем открытии в автобиографии: «Сложилось мнение, будто счастливый случай привел эту звезду в поле зрения моего телескопа. Это очевидная ошибка. Я последовательно рассматривал каждую звезду на небе – и не только такой величины, как звезда, на которую я обратил внимание той ночью, но и гораздо меньше…. Если бы в тот вечер мне помешали дела, я должен был бы найти ее следующей ночью. Качество моего телескопа позволило мне различить видимый

диск планеты, едва я взглянул на нее».

Следуя традиции, согласно которой новые большие открытия посвящались членам правящей династии, Гершель назвал планету в честь короля Георга III – *Georgium Sidus*, что значит «Звезда Георга». Традиция не подвела Гершеля, и король пригасил его в Лондон, а через некоторое время и вовсе пожелал сделать королевским астрономом. На самом деле ситуация сложилась довольно щекотливая: можно ли сделать человека без дворянского происхождения и соответствующего образования королевским астрономом? Король долго тянул, несмотря на то что Гершель блестяще выдержал все испытания, но в итоге, уступив доводам и давлению друзей Гершеля, был вынужден сдаться. Таким образом, новоиспеченный королевский астроном покинул Бат и переехал в окрестности Виндзора, где полностью отказался от музыки и посвятил себя науке. Вслед за братом из Бата уехала и Кэролайн.

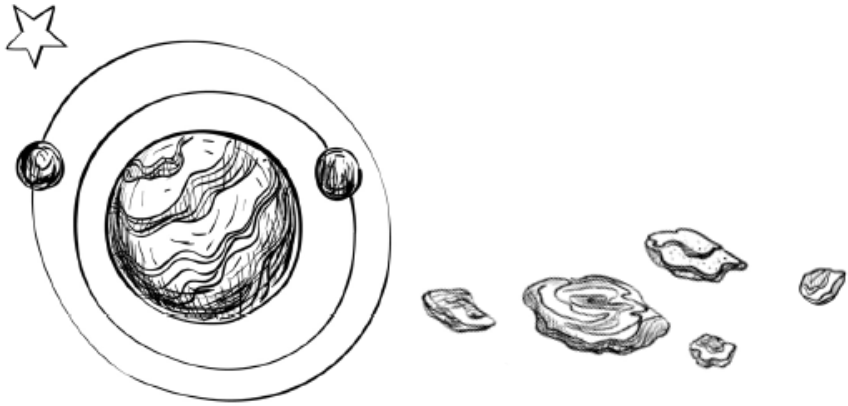
При дворе Гершель продолжал методично наблюдать за небом, изучая звезды и туманности. В 1784 году, проделав большую работу, он опубликовал статью под названием «Отчет о некоторых наблюдениях, направленных на исследование строения небес»[59], где утверждал, что туманности – это гигантские скопления звезд, собранных вместе гравитацией. В статье описана Вселенная, главной силой в которой является сила притяжения: более тяжелые звезды притягивают более легких соседей, и это приводит к тому, что образуются скопления, воспринимаемые нами с большого расстояния как размытые пятнышки света. Гершель первый предположил, что туманности Ориона и Андромеды могут иметь огромные размеры и содержать невообразимое число звезд, то есть, выражаясь современным языком, представлять собой другие, отличные от Млечного Пути, галактики. Заметив, что одни скопления звезд более плотные, тогда как другие более разреженные, и поразмышляв над этим, Гершель решил, что кластер звезд со временем становится все плотнее и плотнее, пока не сожмется под действием гравитации. Возможно, думал он, именно этот механизм в конечном итоге приводит к появлению планет.

В 1785 году стало совершенно понятно, что точности существующих рефлекторов недостаточно и нужно строить инструменты с более значительным фокусным расстоянием. Летом 1785 года проект нового, 40-футового (~12 м) телескопа был представлен королю. Георг III, который хотел войти в историю как покровитель науки, согласился финансировать этот проект. Но денег, выделенных монархом, все равно не хватило. Большую часть стоимости телескопа оплатил сам Гершель из

собственных средств.

Примерно раз в 15 лет Сатурн поворачивает свои кольца к Земле так, что становится удобно наблюдать их во всей красе и исследовать спутники этой планеты. Со времен Гюйгенса и Кассини, живших во второй половине XVII века, было известно пять спутников Сатурна: Титан, Япет, Рея, Тефия, Диона. В 1787 году, когда «окольцованный» гигант снова повернулся к Земле боком, Гершель направил на него свой 20-футовый (~6 м) телескоп и, наблюдая за планетой почти 17 ночей, как будто бы заметил у нее шестой, неизвестный до сих пор спутник. Но полной уверенности у астронома не было. Через год погодные условия помешали провести полноценные наблюдения. Еще через год, 28 августа 1789 года, когда 40-футовый рефлектор уже достроен, Гершель вновь наблюдает Сатурн и понимает: ошибка исключена. То, что он видит в телескоп, лежит в плоскости колец, а значит, является новым, еще не описанным спутником Сатурна. Гершель срочно пишет официальное письмо о своем открытии президенту Лондонского королевского общества сэру Джозефу Бэнксу. Переживая, что его первенство могут оспорить, Гершель, уже в личном письме, добавляет, что открытие было сделано еще два года назад, но дела не позволили объявить о нем вовремя. За шестым спутником почти сразу последовало открытие седьмого – 17 сентября того же года. Это был триумф Гершеля и его телескопов. Сегодня мы знаем эти спутники Сатурна как Энцелад и Мимас.

Как только Уильям забрал Кэролайн из родительского дома, он посвятил ее в свои астрономические увлечения. Первое время она помогала брату, шлифуя стекла и систематизируя его наблюдения. В Виндзоре Уильям сконструировал для нее маленький телескоп, с помощью которого она могла наблюдать за небом. Кэролайн хотела проводить собственные исследования. Поскольку ее телескоп не обладал такой точностью, как большие телескопы брата, она посвятила себя поискам комет, а параллельно занималась созданием каталога звезд. Первую комету Кэролайн обнаружила в 1786 году. Всего за 11 лет наблюдений она нашла восемь комет.



На этом месте мы остановим наше краткое жизнеописание Уильяма и Кэролайн Гершель. Стоит добавить лишь, что в последующие годы они продолжили свои плодотворные наблюдения. Брат и сестра нашли 2 500 новых туманностей и 800 двойных звезд, совершив четыре полных обзора северного неба за все годы наблюдений. Уильям также обнаружил, что шапки Марса меняются с течением года, популяризовал термин «астероид» для обозначения нового класса небольших тел Солнечной системы. Он первым начал изучать форму нашей галактики и правильно предположил, что она дискообразная. В 1800 году Гершель открыл существование «невидимой формы света» – инфракрасного излучения Солнца. Кроме того, он участвовал в создании Королевского астрономического общества и даже был избран иностранным членом Шведской королевской академии наук. Умер Уильям Гершель 25 августа 1822 года. Эпитафия на его могиле гласит: «Он прорвался сквозь небесные барьеры».

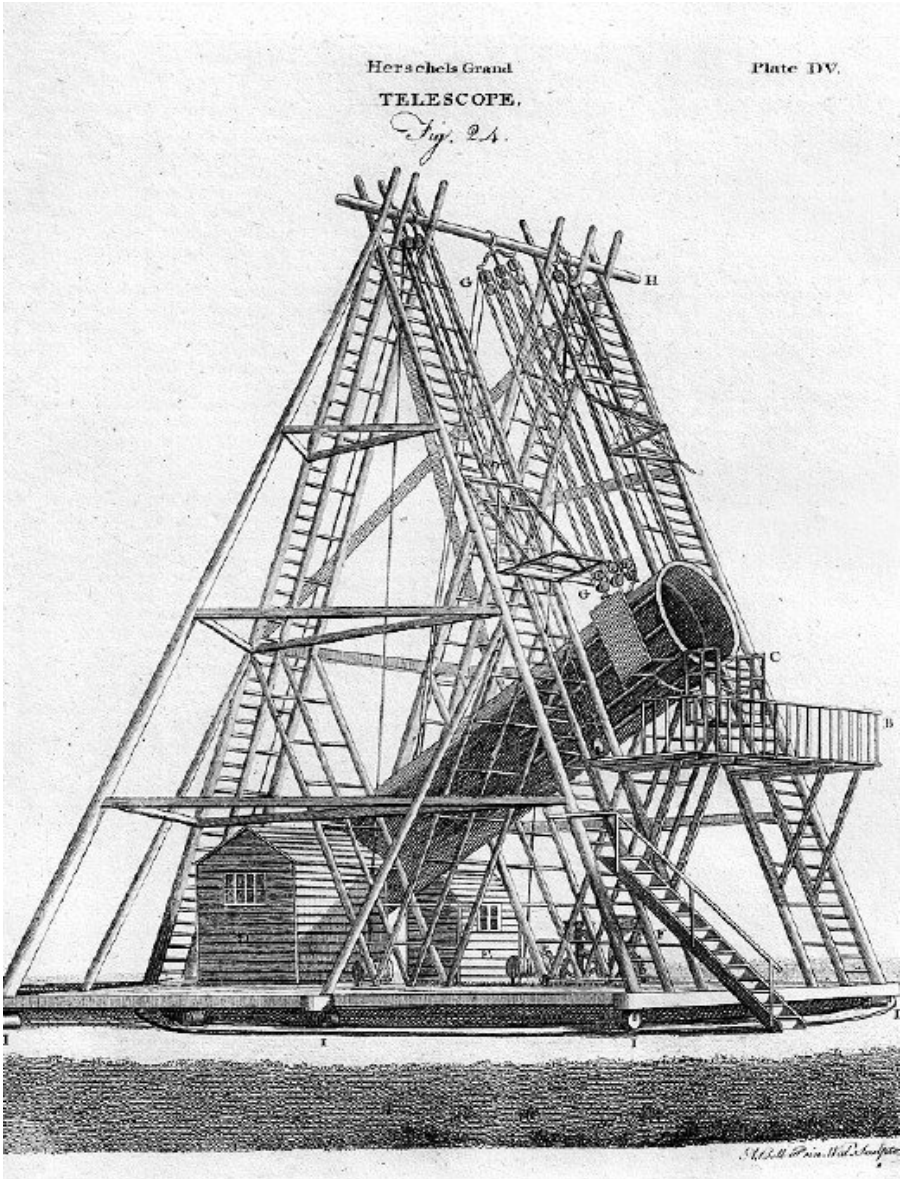


Рисунок 18. 40-футовый рефлектор. Рисунок Гершеля с посвящением королю Георгу III, сделанный для журнала *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1795 год

Кэролайн пережила брата на 27 лет. В 1828 году Королевское астрономическое общество наградило ее золотой медалью за работу по созданию каталога туманностей, над которым она трудилась после смерти брата, оставив наблюдения. Она стала первой женщиной, удостоенной такой чести, и на протяжении 170 последующих лет оставалась единственной женщиной, получившей столь высокую награду.

* * *

О том, что представляют собой спутники планет-гигантов, человечество не знало вплоть до конца XX века. Безусловно, газовые гиганты вызывали у астрофизиков большой интерес. Как вы увидели на примере экзопланет, данные, которые можно получить с Земли, дают лишь общее представление об изучаемом небесном теле.

Первой миссией человечества в далекий космос, сквозь Солнечную систему и дальше, стали экспедиции аппаратов «Пионер-10» и «Пионер-11», стартовавшие с Земли в 1970-х годах. Вслед за ними последовали аппараты серии «Вояджер». На пути прочь из Солнечной системы они, пересекая орбиты Юпитера и Сатурна, сделали фотографии планет-гигантов и некоторых из их спутников и получили ряд ценных научных данных. Этих сведений оказалось достаточно, чтобы начать готовить автоматические экспедиции к газовым гигантам: «Галилео» – к Юпитеру и «Кассини» – к Сатурну. В те времена ученые понимали, что им предстоит узнать много неожиданных вещей об этих планетах, но, наверное, никто не предполагал, что самые поразительные, порой даже шокирующие открытия будут связаны не с самими планетами, а с их, казалось бы невзрачными, спутниками. Согласно существовавшей тогда парадигме эти маленькие холодные миры считались чуть ли не самым скучным местом во Вселенной. Почему так? Давайте разбираться. Рассмотрим, к примеру, один из спутников Юпитера – Европу.

Европа – самый маленький из четырех так называемых галилеевых спутников и шестой по удаленности от Юпитера. Название, данное ему Галилеем[60], не прижилось, и сегодня этот спутник носит имя мифологической возлюбленной Зевса. Диаметр Европы меньше, чем диаметр Луны, а температура поверхности составляет –220 °C. За миллиарды лет, прошедших с момента образования спутника, недра должны были остыть, что исключает всякую тектоническую активность. Еще несколько десятилетий назад считалось, что Европа – это примитивное каменисто-ледяное тело.

Пролет «Вояджеров» мимо системы Юпитера дал возможность более точно, чем с помощью наземных телескопов, измерить альбедо Европы – отношение количества отражаемого поверхностью солнечного света к падающему на нее – и, соответственно, понять, из какого материала преимущественно состоит поверхность этого небесного тела. Им оказался обычный водяной лед (при столь низкой температуре поверхности он имеет прочность камня).

На снимках «Вояджеров» поверхность Европы выглядела неоднородной: на ней виднелись светлые и темные области. На тот момент чем это может быть вызвано, выяснить не удалось. Ответ появился в 1995 году, когда на фотографиях, полученных от зонда «Галилео», ученым открылся грязновато-ледяной мир, где равнины с разломами и метеоритными кратерами (которых, однако, было намного меньше, чем на других спутниках Юпитера) перемежались с равнинами, практически лишенными трещин и углублений. Но не это поразило исследователей больше всего. Все указывало на то, что под ледяной корой Европы есть океан жидкой воды. Поиски ответов на вопросы, как такое могло случиться и что из этого следует, дали мощный толчок для развития науки о внеземной жизни – астробиологии.

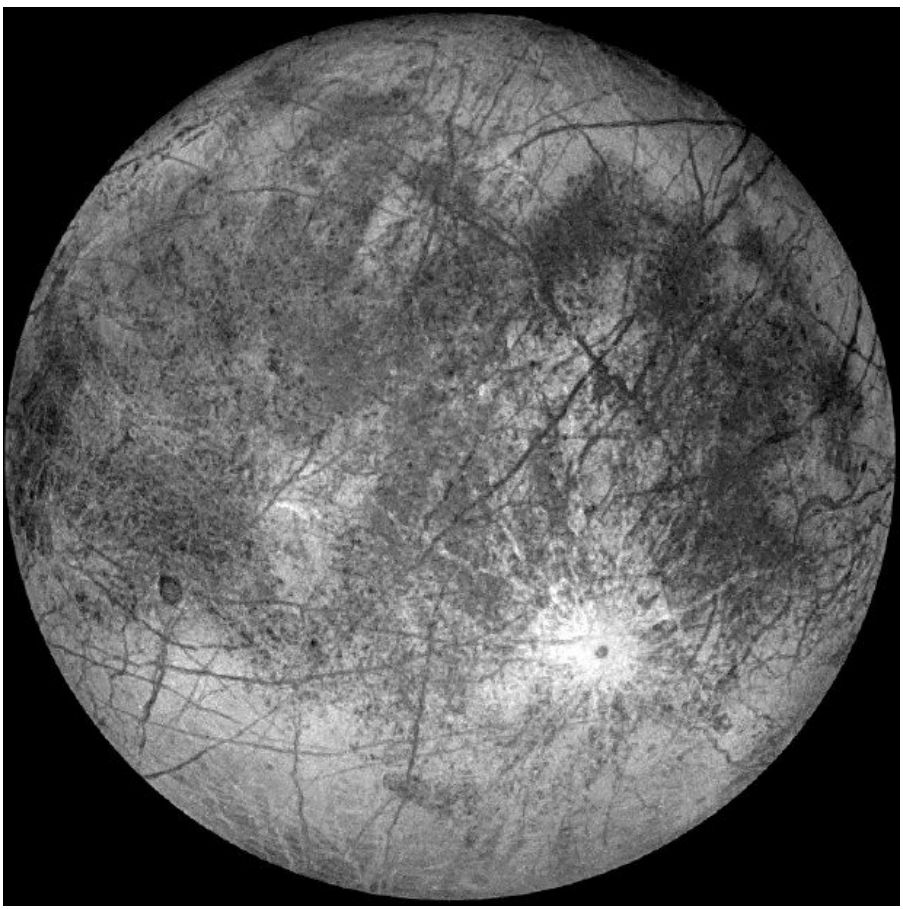


Рисунок 19. Изображение Европы, сделанное «Галилео»

Столь удивительное открытие удалось сделать, конечно же, не прямым, а косвенным методом. На наличие огромного водоема под поверхностью Европы указывало два факта. Первый состоял в

том, что этим можно было объяснить столь необычный рельеф спутника. Так как не существовало никаких причин, по которым на одну область Европы падало бы меньше метеоритов, чем на другую, это означало, что некоторые участки поверхности луны являются более молодыми, чем другие.

Второй факт был связан с магнитным полем Европы, обнаруженным аппаратом «Галилео». Вообще, магнитное поле небесных тел генерируется, когда внутри них происходит постоянное движение какого-нибудь проводящего материала. На Земле и Меркурии источником магнитного поля является жидкое проводящее ядро, на Юпитере – движение металлического водорода[61]. Но что служит источником магнетизма на крохотном холодном небесном теле изо льда и камня? Единственный разумный ответ – подповерхностный соленый океан воды, объем которого больше, чем объем всех океанов Земли, вместе взятых.

Чистая, дистиллированная, вода сама по себе не проводит электричество, но соленая является прекрасным проводником. На Европе вода обогащается солями, скорее всего, за счет вымывания минералов из глубинных горных пород. Метеориты, падения которых раскалывают ледяной покров, служат дополнительным источником минералов. Ледяные «раны» со временем «залечиваются» новой водой, поступающей из глубин и обновляющей поверхность. Наиболее крупные трещины образовались, вероятно, под действием внутреннего «распирающего» давления океана на ледяной щит.

К сожалению, мы пока мало можем сказать о том, какой толщины ледяной панцирь Европы. Существует две его модели: толстого льда и тонкого льда. Согласно первой толщина льда составляет 5–20 км, согласно второй – всего несколько сотен метров. Какая модель правильная, мы сможем понять, узнав, сколько тепла генерируется в недрах Европы.

Сейчас не вызывает сомнений, что причиной таяния подповерхностного льда Европы является Юпитер. Никакой новой физики в этом явлении нет. Европа двигается вокруг планеты-гиганта по немного вытянутой орбите. Это означает, что на нее действуют приливные силы со стороны планеты, а недра подвергаются постоянной деформации. Подобно тому, как кусочек пластилина разогревается, если его мять, разогревается и внутренняя часть Европы, что приводит к таянию льда и позволяет поддерживать температуру растопленной воды всегда выше точки замерзания. Движение луны по вытянутой орбите сквозь магнитное поле Юпитера генерирует электрические токи в образовавшемся океане, а уже эти токи создают магнитное поле,

которое и обнаружил «Галилео».

Еще одним доказательством существования подповерхностного океана служат выбросы воды в космос. В 2012 году телескоп «Хаббл» наблюдал шлейф, оставленный одним таким выбросом, вблизи южного полюса Европы. Его высота, по оценкам специалистов, составляла 200 км, причем гейзер извергал воду со скоростью около 5 т/с. В 2018 году американские ученые получили еще одно свидетельство наличия гейзеров на Европе. Предметом их внимания стали данные, которые прислал на Землю «Галилео». Выяснилось, что показания магнитометра и плазменного спектрометра свидетельствуют о том, что еще в 1997 году «Галилео» пролетел сквозь облако, оставленное одним таким выбросом. Если бы 20 лет назад мы могли правильно интерпретировать показания этих приборов, то уже тогда узнали бы о водяных шлейфах Европы.

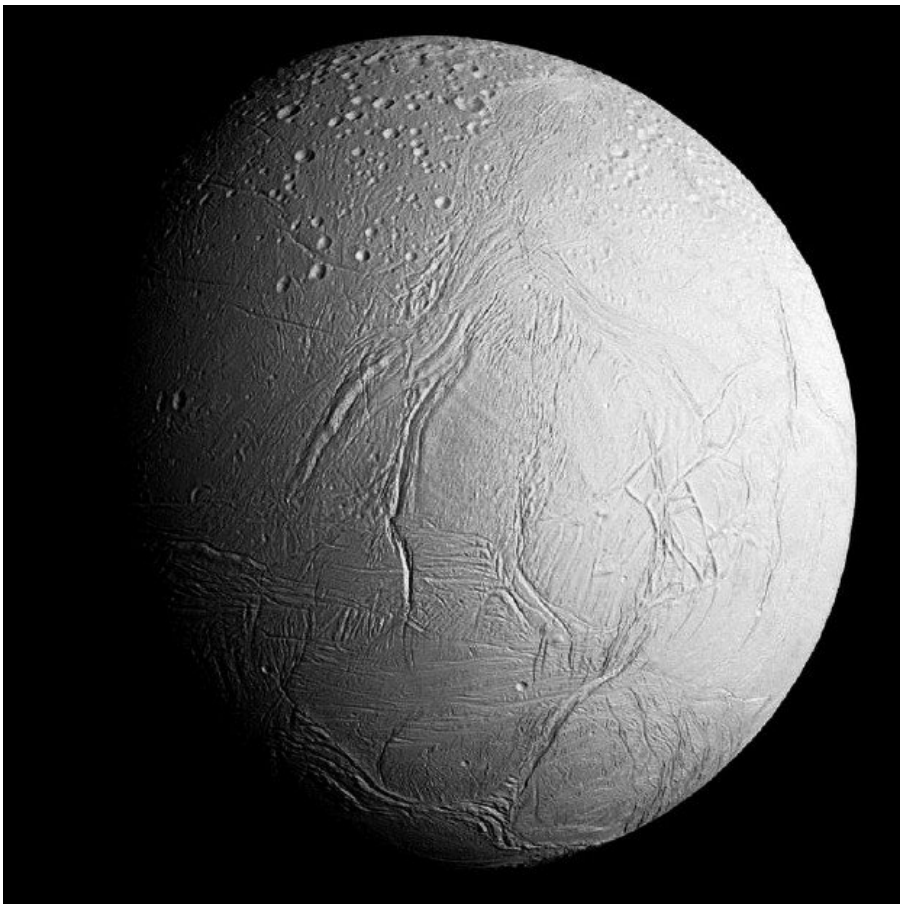


Рисунок 20. Изображение Энцелада, сделанное «Кассини»

Обнаружение океана жидкой воды на задворках Солнечной

системы вызвало ажиотаж у постоянных читателей научных изданий. Возможность наконец-то найти внеземную жизнь не в далеком космосе, а буквально у себя под носом выглядела очень привлекательной. Казалось, теперь свидетельства ее существования можно будет получить, даже не пробуривая множество километров льда, а лишь с помощью тщательного анализа выброшенного в космос вещества. Таким образом, всего за несколько лет Европа из скучнейшего места во Вселенной превратилась в одно из самых перспективных тел Солнечной системы, где могли быть найдены инопланетяне[62]. Исследуя магнитосферы других спутников Юпитера, «Галилео» обнаружил также, что еще два из них, Ганимед и Каллисто, имеют подповерхностные океаны. К сожалению, ни на одном из них не зафиксированы выбросы гейзеров.

Научная программа «Галилео» завершилась в 2003 году: зонд сгорел в атмосфере Юпитера, чтобы исключить возможность «заражения» поверхностей его спутников земными микроорганизмами, если те смогли выжить в течение 14 лет в глубоком космосе.

В одном ряду с Европой – как местом, где потенциально есть жизнь, – стоит Энцелад, спутник Сатурна, открытый Уильямом Гершелем в 1789 году. Энцелад в три раза меньше Европы – его диаметр равен всего 500 км. Пролетая мимо Энцелада в 1980 году, «Вояджеры» сделали множество фотографий спутника. Обнаружилось, что он отражает почти весь падающий на него свет – около 90 %, даже больше, чем Европа, – и имеет разнообразный рельеф с участками, покрытыми разломами и кратерами, а также равнинами, практически лишенными и того и другого. Инфракрасные камеры «Вояджеров» подтвердили догадку о том, что поверхность Энцелада состоит из водяного льда. Однако следующий этап в изучении спутника начался лишь спустя 25 лет.

В 2004 году межпланетная станция «Кассини» добралась до системы Сатурна, а в 2005 году впервые облетела Энцелад. Ученые обнаружили, что силовые линии магнитного поля Сатурна как бы упираются в Энцелад, а не проходят сквозь него, как должны были бы, будь это примитивное мертвое тело – остывший кусок льда и камня. Объяснить подобное явление могло бы наличие атмосферы на спутнике. В итоге у «Кассини» изменили программу полета и направили его на орбиту Энцелада высотой всего 170 км. Но вместо атмосферы ученые увидели в южной полярной области спутника шлейфы воды, смешанной с азотом, аммиаком и органическими веществами. Они образовались так же, как на Европе, – это гейзеры, бьющие на

сотни километров вверх. Часть воды оседает на поверхность в виде ледяных частиц, а часть уносится в пространство. Более того, эти выбросы даже сформировали одно из колец Сатурна.

Доказательства существования подповерхностных водоемов, скрытых подо льдом Энцелада, были обнаружены не так, как в случае с Европой. Находясь на орбите спутника, «Кассини» без видимых причин то немного ускорялся, то замедлялся. Наличие этих колебаний скорости говорило о том, что гравитационное поле Энцелада неоднородно: подо льдом есть более или менее плотные участки. К такому эффекту обычно приводит то, что под поверхностью тела находятся вещества с разной плотностью. Вещество с большей плотностью при том же объеме обладает большей массой и вызывает большую силу притяжения, чем вещество с меньшей плотностью. Кроме того, плотность может меняться у одного и того же вещества, находящегося в разных агрегатных состояниях. Вода в жидком состоянии, например, обладает большей плотностью, чем в твердом (именно поэтому лед выталкивается водой, и с айсбергами сталкиваются корабли, а не подводные лодки). Расплавленный камень, наоборот, обладает меньшей плотностью, чем затвердевший. В 2014 году появилась работа, в которой анализируются гравитационные аномалии Энцелада[90]. Авторы статьи утверждают, что эти аномалии объясняются, если предположить, что на южном полюсе под коркой льда толщиной в 30–40 км находится подповерхностное озеро площадью 80 000 км^2 и глубиной около 10 км.

В 2014 году «Кассини» пролетел сквозь один из гейзеров Энцелада и проанализировал его состав: оказалось, что, помимо соли и воды, в нем содержится множество сложных органических молекул (гораздо сложнее, чем на Европе), высоки концентрации углекислого газа и водорода. Возможное наличие внутреннего источника тепла, воды и сложных органических молекул делает Энцелад, пожалуй, самым благоприятным местом для внеземной жизни в Солнечной системе.

Еще одним членом семьи Сатурна, о котором следует рассказать, является Титан – первый из обнаруженных спутников Сатурна, открытый Кристианом Гюйгенсом в 1655 году. Объявление об открытии Титана, которое сделал Гюйгенс, кто-то может посчитать изящной шуткой изящного века, а кто-то – гениальным выходом из ситуации, когда с одной стороны, боишься упустить приоритет открытия, а с другой – не желаешь быть опозоренным, если все же ошибся в наблюдениях. Так вот, Гюйгенс разослал своим коллегам цитату из поэмы Овидия со случайным набором слов в конце. Через год, когда ученый уже

был полностью уверен в совершенном открытии, он выпустил памфлет с расшифровкой: слова оказались анаграммой фразы «Спутник обращается вокруг Сатурна за 16 суток и 4 часа».

«Кассини» летел к системе Сатурна не в одиночку. Он нес с собой спускаемый аппарат «Гюйгенс», который должен был приземлиться на поверхность Титана[63]. Такое внимание спутнику было оказано не зря. Титан – самый большой естественный спутник планеты в Солнечной системе, больше, чем планета Меркурий, и единственный спутник, который обладает плотной атмосферой – ее плотность даже больше, чем плотность земной атмосферы. Правда, тут очень холодно. Температура поверхности примерно такая же, как и у других малых тел в системе газовых гигантов, – -170–180 ˚С.

В 2005 году «Гюйгенс» совершил мягкую посадку на поверхность Титана и передал данные об условиях в его атмосфере и на поверхности, а также завораживающие фотографии местных пейзажей. До посадки аппарата никто не знал, на какую именно поверхность он сядет, поэтому «Гюйгенс» приспособили даже для плавания. Сел он необычно. Впоследствии изучение телеметрии посадки показало, что при первом контакте с поверхностью «Гюйгенс» опустился на 12 см, потом немного отскочил и, прежде чем остановиться, проскользил. На Земле такая ситуация возможна, если поверхность покрыта снегом с тонкой ледяной коркой. А значит, «Гюйгенс» совершил посадку в некое, возможно, подобное земному снегу вещество.

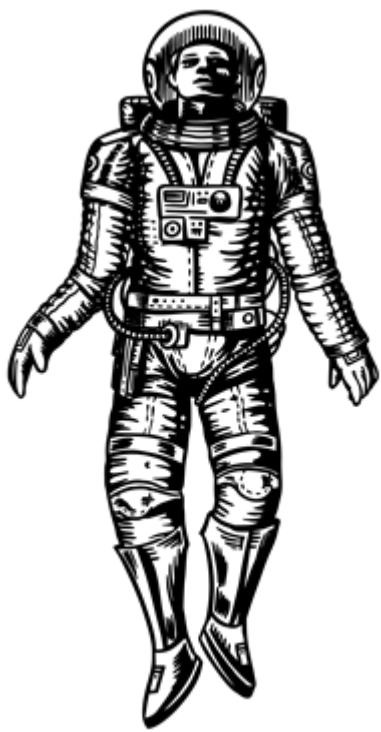
При посадке на Титан «Гюйгенс» не заметил водоемов, однако последующие радиолокационные исследования Титана выявили удивительный, похожий на земной рельеф: равнины, покрытые дюнами; невысокие яркие холмы из водяного льда; большие, до сотен метров глубиной жидкие озера с изрезанными берегами и реки. Но это мир другой, чуждой нам химии. Роль воды в озерах и реках взяли на себя вещества, которые на Земле в чистом виде мы привыкли видеть только в газообразном состоянии: метан и этан, а роль снега – осадки из сложных органических веществ.

Гигантский завод органической химии – это слова, которые лучше всего характеризуют Титан. Его атмосфера на 95 % состоит из азота, 4 % принадлежат метану, а еще 1 % приходится на другие вещества. В ней постоянно присутствуют туманы из взвеси легких микроскопических частиц (это смесь углеводородных молекул), образующих плотную оранжевую дымку. Оседающие на поверхность частицы называются «толины», что в переводе с греческого значит «мутный». В ходе идущих здесь химических

процессов, по большей части малоизученных, производится множество органических веществ – от самых простых до невероятно сложных. Какие бы химические реакции мы тут не обнаружили, все они черпают энергию лишь из далекого и тусклого Солнца, и потому их скорость для нас ничтожно мала. Если мы когда-нибудь найдем на Титане что-нибудь живое, из-за его медлительности, вызванной низкотемпературным метаболизмом, мы можем просто не заметить это что-нибудь.

Удивительно, что согласно исследовательской работе, проведенной в 2012 году[91], под поверхностью Титана есть океан жидкой воды. Гравитационное влияние Сатурна на спутник в три раза больше, чем то, которое было бы, если бы Титан полностью состоял лишь из горных пород. Этот океан должен быть довольно близко к поверхности и начинаться не глубже чем на отметке 100 км. Судя по всему, он зажат между ледяными прослойками и никак не контактирует с поверхностью, что исключает обмен минеральными веществами, необходимыми для жизни.

Итак, мы вряд ли найдем на Титане жизнь, хоть в чем-то напоминающую земную. Но разве кто-то говорил, что жизнь должна быть похожа на нашу? Может ли химия Титана породить самоподдерживающиеся химические реакции, развивающиеся по законам естественного отбора? Покажет время.



Глава 12. Блуждающие миры и гравитационное микролинзирование

People are strange when you're a stranger.

THE DOORS. PEOPLE ARE STRANGE

Все это время мы говорили о планетах как об очевидном и не требующем разъяснения понятии. На самом деле это не так. Можно сказать, что вопрос о том, что такое планета, в научном сообществе начал ставиться с тех самых пор, как были открыты первые экзопланеты – новые, странные миры, не похожие ни на что в Солнечной системе. Для ответа на этот вопрос в 1999 году создали рабочую группу по внесолнечным планетам, которая должна была помочь международному научному сообществу определиться с тем, что в дальнейшем будет называться планетой. Через несколько лет, в 2003 году, она наконец смогла создать временное определение планеты, чтобы в будущем, когда это заставят сделать очередные открытия, к нему вернуться.

Открытия не заставили себя долго ждать. Буквально в этом

же 2003 году астроном Майкл Браун с коллегами обнаружил в поясе Койпера Седну (радиус 500 км)[92], а в 2005 году – Эриду (радиус 1 100 км)[93]. Далее последовали открытия чуть меньших, чем Эрида, объектов: Макемаке и Хаумеа. Дилемму, которая вслед за этими событиями встала перед учеными, можно сформулировать так: необходимо было либо добавить в Солнечную систему четыре новые планеты и быть готовыми к тому, что с открытием очередных объектов в поясе Койпера количество планет в нашей звездной системе может существенно возрасти, либо же изменить определение понятия «планета» таким образом, чтобы большого числа новых планет не появлялось.

26 встреча Международного астрономического союза (МАС) была организована в Праге в августе 2006 года как раз для решения этой дилеммы и выработки нового определения термина «планета». В последний день объявили голосование, и победила следующая формулировка: планета – это тело, обращающееся вокруг Солнца, достаточно массивное, чтобы поддерживать гидростатическое равновесие (иметь форму, близкую к шарообразной) и расчищать свою орбиту от других объектов.

Первые два критерия астрономы неявно использовали чуть ли не с XVIII века, когда планетой называли любое крупное тело на орбите вокруг Солнца, третий же критерий оказался совершенно новым. В результате в 2006 году впервые произошло не увеличение, а уменьшение числа планет: Плутон исключили из перечня последних (поскольку он не соответствует третьему критерию). Также были введены еще два класса объектов Солнечной системы. Представители первого из них, карликовые планеты, отличаются от обычных тем, что третий критерий в их определении звучит так: не являются спутником другой планеты[64]. Второй же класс включил в себя все, что осталось: малые тела Солнечной системы. Ну а если в первом критерии слово «Солнце» заменить на «звезда» мы получим определение понятия «экзопланета».

* * *

В первых главах я крупными мазками нарисовал картину рождения планетных систем в протопланетном диске. Но на этом переустройство звездной системы не заканчивается. Материала, который содержится в протопланетном диске, достаточно для создания гораздо большего числа планет, чем астрономы находят вокруг звезд. Часть этого материала действительно рассеивается

в пространстве, а часть образует планетезимали или планеты. В восьмой главе была описана гипотеза о миграции, согласно которой в первые миллионы лет газовые гиганты, уже успевшие сформироваться, взаимодействуя с газом, меняют свои орбиты. Во время этой перестройки происходят катастрофические события: сталкиваются и разрушаются миры, многие планетезимали выбрасываются из диска. На начальных этапах эволюции протопланетного диска даже сформировавшиеся планеты могут покинуть систему родительской звезды навсегда. На сегодняшний день различными методами найдено 20 кандидатов в такие свободно плавающие планеты[94].

Сколько и какие планеты покинули Солнечную систему, мы не узнаем уже, наверное, никогда. Понятно, что планеты с малой массой с большей вероятностью могут быть выброшены из системы, чем гигантские планеты вроде Юпитера. Означает ли это, что в Солнечной системе всегда было четыре газовых гиганта? Нет. Как показало одно из исследований 2011 года, модели планетной системы, включающие пять газовых гигантов, могут объяснить орбиты Земли и Марса лучше, чем модели только с четырьмя[95]. Возможно, планета размером с Нептун сформировалась и была выброшена из Солнечной системы на заре времен. Что касается планет земной группы, то нашу систему могло покинуть до десяти планет размером с Марс. Конечно, компьютерные модели – это ни в коем случае не доказательства, но они иллюстрируют возможности.

Какова судьба этих планет-странников? В первую очередь она определяется их строением, потому что при отсутствии внешних источников энергии их место занимают внутренние (если они, конечно, есть). Если выброшенная планета имеет марсианские размеры, она остынет достаточно быстро – в первые сотни миллионов лет своей жизни[65]. Недра более крупных планет, размером с Землю и больше, будут остывать миллиарды лет, подогреваемые жаром конвективных потоков в мантии и энергией распада радиоактивных элементов. Если тело представляет собой спутник выброшенного в свободное плавание газового гиганта, то энергия приливной деформации позволит его недрам сохранять высокие температуры практически безгранично долго, а в подледных океанах планеты могут быть все условия для существования жизни.

Лишенные родительской звезды планеты – их называют блуждающими планетами, а также планетами-бродягами или планетами-сиротами – долгое время существовали лишь на бумаге. Но однажды такую планету наконец удалось обнаружить.

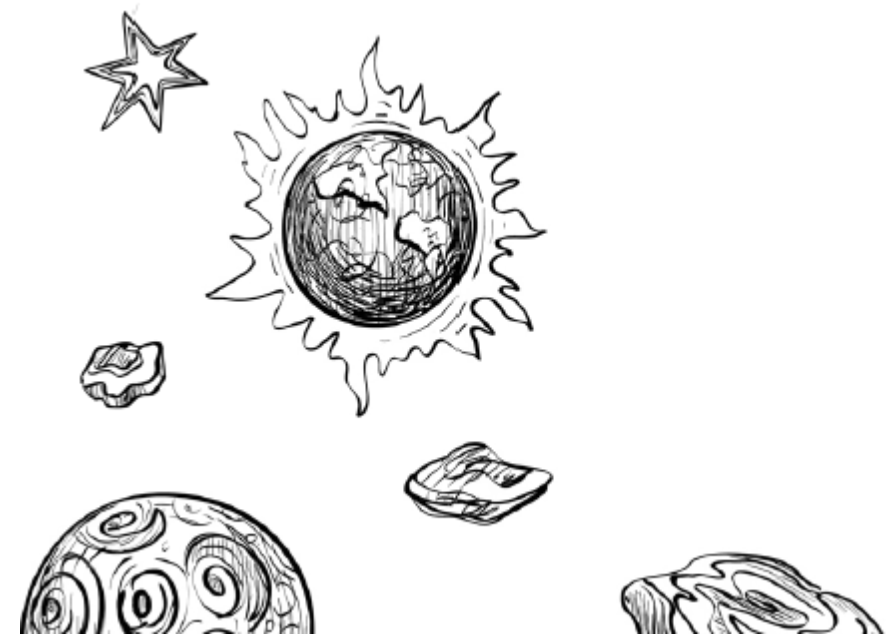
Двумя самыми эффективными методами поиска экзопланет

являются транзитный метод и метод радиальных скоростей. Так как оба ориентированы на отслеживание звездного света, очевидно, что для поиска блуждающих планет они не подходят. Некоторые еще не остывшие блуждающие планеты являются источниками излучения – невидимого глазу инфракрасного света. Поиск источников инфракрасного излучения для обнаружения планет-бродяг в нашей галактике был бы хорошей идеей, если бы не точность измерительной аппаратуры, которая оставляет большой простор для интерпретации наблюдений.

Первой подтвержденной блуждающей планетой, статус которой у большинства астрофизиков не вызывает сомнений, стал объект, обнаруженный в 2013 году и получивший причудливое название *PSO J*318.5-22[96]. Цифры – это координаты объекта на небе, а *PSO* – сокращение от *Pan-STARRS* 1 *Object*, что значит «объект, обнаруженный телескопом *Pan-STARRS* 1».

Телескоп *Pan-STARRS* 1 входит в группу из двух обзорных телескопов (всего планируется четыре), диаметр главного зеркала каждого из которых равен 1,8 м. Комплекс расположен на вершине вулкана Халеакала на острове Мауи, принадлежащем Гавайскому архипелагу. Особенность этих телескопов состоит в том, что они не «смотрят» в одну точку, а охватывают большой участок неба с угловым диаметром около 3° (для сравнения: видимый угловой диаметр Луны приблизительно 0,5°). Несколько раз в месяц с помощью телескопов *Pan-STARRS* ученые получают изображения неба, и каждое из них состоит из полутора миллиардов пикселей, а общий объем собранных за ночь данных может достигать 10 ТБ. Специальное программное обеспечение анализирует эти изображения, сравнивает их с каталогом неподвижных звезд и ищет те объекты, которые изменили свое положение или яркость.

Основная задача *Pan-STARRS* состоит в том, чтобы находить на небе астероиды. Если вы следите за астрономическими новостями, то наверняка слышали о первом межзвездном астероиде *1I/Oumuamua*, обнаруженном в октябре 2017 года как раз этой системой. Между тем охват большой площади неба и диапазон электромагнитных волн, в котором работает *Pan-STARRS*, позволяют использовать ее и в других проектах – в частности, для поиска коричневых карликов по характерному тепловому излучению.



Объект *PSO J*318.5-22, находящийся в 80 св. годах от Земли, впервые привлек внимание ученых в 2010 году своим цветом: значительно более красным, чем у любого ранее известного коричневого карлика. Что более странно, его цветовые характеристики оказались очень близки к тем, что наблюдаются у молодых планет с сильно запыленными атмосферами в протопланетном диске, однако никакой звезды рядом с *PSO J*318.5-22 нет. В статье 2013 года ученые, обнаружившие этот странный объект, из осторожности даже не употребляли термин «блуждающая планета», а ограничились тем, что рассказали о свойствах нового класса субзвездных объектов. Что именно произошло с *PSO J*318.5-22 и почему она потеряла свою родительскую звезду – скорее всего, для нас это останется тайной. Но главное, что мы поняли благодаря ее обнаружению, это то, что одиночные блуждающие планеты – вполне реальное явление в Галактике.

Можем ли мы выяснить, откуда родом *PSO J*318.5-22? Вообще говоря, нам вряд ли когда-нибудь удастся точно определить родительские звезды блуждающих планет. Ведь вместо того чтобы вращаться вокруг звезды, они вращаются вокруг галактического центра сколь угодно далеко от своей родительской звезды. Но в случае с *PSO J*318.5-22 нам повезло. Рядом с тем местом, где ее обнаружили, находится скопление, известное как движущаяся группа звезд Беты Живописца. Это скопление молодых звезд, названное именем самой яркой звезды в его составе и

движущееся с сопоставимой с *PSO J*318.5-22 скоростью. Логичным представляется предположение, что наша героиня родом из этого скопления. Видимо, она сформировалась рядом с одной из звезд и была выброшена вовне на ранних этапах эволюции протопланетного диска в результате взаимодействия с другой планетой или соседней звездой. Если это действительно так, то сравнение *PSO J*318.5-22 со звездами Беты Живописца позволяет определить возраст планеты: от 8 до 20 миллионов лет. А благодаря имеющимся в нашем распоряжении моделям эволюции субзвездных объектов можно установить и некоторые физические свойства *PSO J*318.5-22. Так, ее масса составляет 6–7 M_J (что намного меньше типичных масс красных карликов!), а температура внешних слоев атмосферы приблизительно равна 1 150 °C. Как видите, по всем характеристикам это совсем юный, пока не остывший газовый гигант.

Еще один вопрос, который возникает в связи с обнаружением блуждающих планет, – всегда ли к их появлению приводят планетарные катастрофы? Возможен ли процесс образования планет из межзвездного газа?

Например, что вы скажете о следующей гипотезе? Рассматривая изображения некоторых областей активного звездообразования, можно увидеть небольшие темные пятнышки на фоне излучения туманности. Особенно ими богаты туманности Розетка и *IC* 1805 (известна также как туманность Сердце). Гёста Гам из Стокгольмской обсерватории в 2007 году предложил называть эти образования глобулеттами. На сегодняшний день найдено уже около тысячи глобулетт в самых разных туманностях. Они представляют собой плотные холодные облака из нейтрального газа. Как правило, глобулетты имеют сферическую форму, их радиус от 300 до 5 000 а. е., а масса вполне сопоставима с массой планет-гигантов или коричневых карликов (от нескольких единиц до нескольких десятков масс Юпитера). Авторы, опубликовавшие в 2007 году статью по результатам исследования таких образований в туманности Розетка, предположили, что из них могут образовываться блуждающие планеты[97].

Происхождение самих глобулетт до сих пор неясно. Мы знаем, что подобные глобулеттам плотные облака газа и пыли могут образовываться в околозвездных дисках в результате гравитационной неустойчивости. Если это произошло, то в протопланетном диске может зажечься второй звездный компаньон или сформироваться планета-гигант. Но в туманностях межзвездный газ обладает гораздо меньшей плотностью, и гравитационные неустойчивости, как считалось,

образовываться в нем не могут. Однако существование маломассивных свободно парящих коричневых карликов и блуждающих планет заставляет пересмотреть эти представления. Видимо, имеется механизм достижения газом большей плотности, но его детали пока ускользают от нашего внимания. Усложняет поиск разгадки и то, что трудно проследить закономерности того, в каких именно местах газовой туманности наблюдаются глобулетты. Многие из них изолированы, расположены далеко от пылевых столбов и областей повышенной плотности. Другие же связаны тонкими нитями с крупными молекулярными облаками и даже друг с другом.

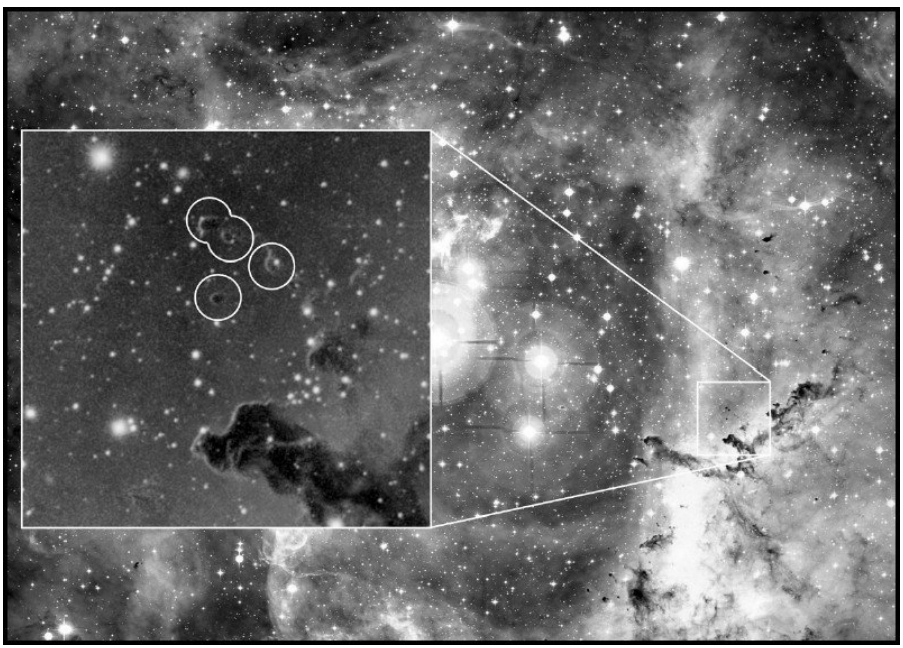


Рисунок 21. Глобулетты в туманности Розетка. Это композиция из изображений, полученных с помощью телескопа «Канада – Франция – Гавайи» через фильтры для инфракрасного света

Ученые, которые занимаются этим вопросом, выдвигают совершенно разные гипотезы. Одни говорят, что глобулетты могут формироваться в результате фрагментации молекулярных облаков подобных тем, что приводят к образованию звезд. Другие считают глобулетты плотными сгустками газа и пыли, которые выбрасываются из околозвездных протопланетных дисков, подобно планетам. А третьи – что глобулетты образуются на границе расширяющихся пузырей горячего газа, которые формируются, когда загорается звезда. Плотность вещества на

этой границе настолько велика, что оно может фрагментироваться в отдельные облака.

Образовавшиеся глобулетты «живут» в очень суровой межзвездной среде. Они подвергаются активному давлению излучения звезд и гравитационным возмущениям со стороны молодых звезд, через них проходят ударные волны и потоки газа. Время их жизни, по разным оценкам, составляет от десятков тысяч до миллионов лет. Те из них, которым повезет не рассеяться, могут коллапсировать и сформировать блуждающую планету или коричневого карлика. В 2013 году Гам с коллегами, изучая снимки туманности Розетка в ближнем инфракрасном диапазоне, нашел плотные ядра в некоторых из самых больших глобулетт[98]. Это еще раз подтверждает гипотезу о том, что некоторые свободно блуждающие планеты, вероятнее всего, образуются из глобулетт. Зная, как часто в туманностях встречаются глобулетты, можно вычислить их число в Галактике. Если даже всего 10 % из тех глобулетт, что существуют в настоящий момент, коллапсируют в блуждающие планеты, то число последних возрастет на 10–20 миллиардов.

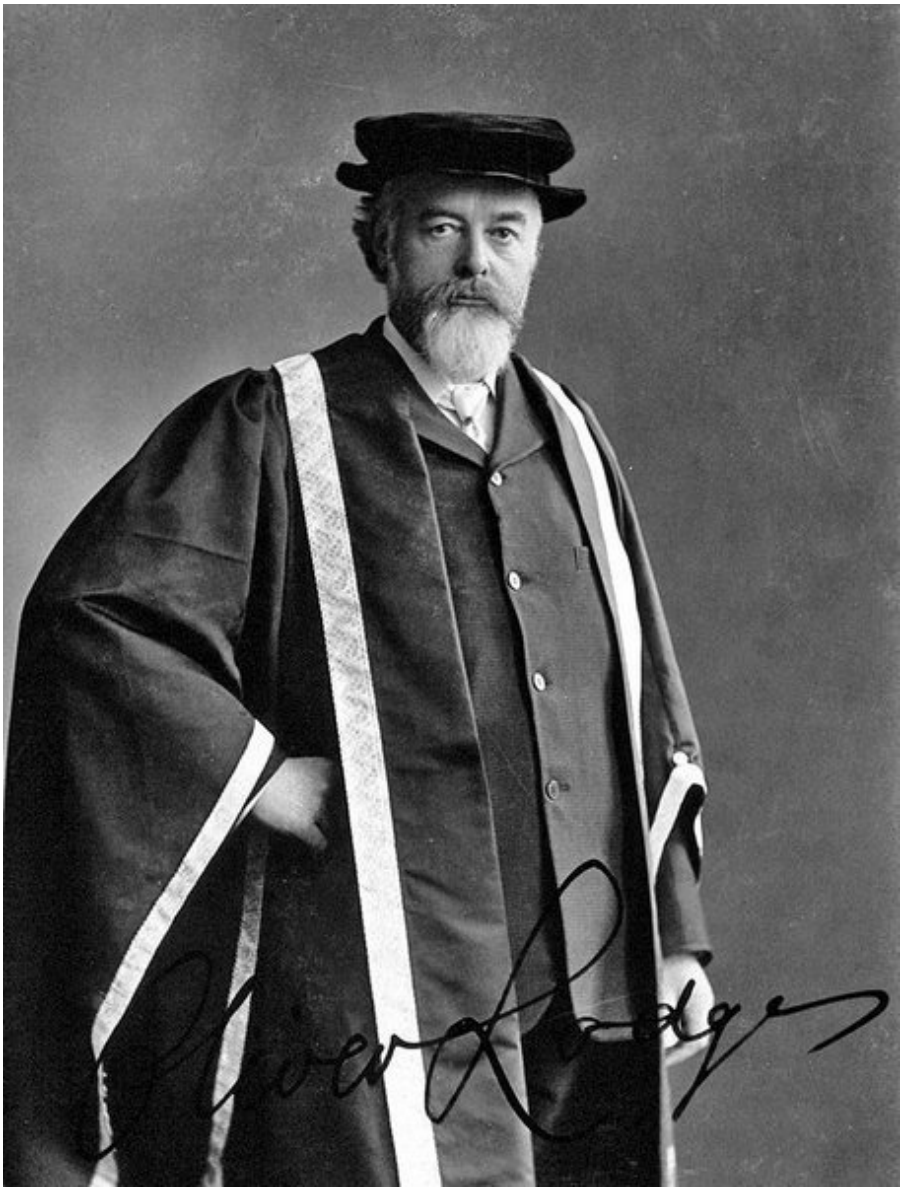
В 2014 году, анализируя архивные данные телескопа «Хаббл», ученые обнаружили газовый гигант *HD* 106906 *b*, вращающийся вокруг одной из звезд в созвездии Южный Крест[99]. И к этому гиганту есть ряд вопросов. Во-первых, его родительская звезда, *HD* 106906, очень молода. Ее возраст оценивается приблизительно в 13 миллионов лет. Обычно к этому времени у звезды еще наблюдаются остатки протопланетного диска – но в данном случае их нет, как нет и других планет в системе. Во-вторых, *HD* 106906 *b* находится невероятно далеко от своей звезды – в 650 а. е. (для сравнения: радиус орбиты Нептуна равен всего лишь 30 а. е.). На таком расстоянии в протопланетном диске просто не может быть достаточного количества вещества, чтобы создать столь массивную планету.

Существует два возможных объяснения особенностей *HD* 106906 *b*. Первое гласит, что уже в самом начале своей эволюции система *HD* 106906 формировалась как двойная система, но вещества, которое досталось второму компаньону, оказалось слишком мало, чтобы в нем смогли начаться ядерные реакции – и образовался газовый гигант. Проблема с этой гипотезой в том, что это крайне нетипичная ситуация. Обычно в двойных системах звезды имеют сопоставимые массы. Масса же *HD* 106906 *b* составляет лишь 1 % от массы звезды, вокруг которой она обращается.

Вторая гипотеза заключается в том, что *HD* 106906 *b* некогда была блуждающей планетой, выброшенной родительской звездой,

но почти сразу ее захватила другая звезда. Каким бы маловероятным ни казался такой сценарий, принципиальных возражений против него у специалистов нет. Сложно сказать, верна ли эта гипотеза, но сама идея того, что планеты могут путешествовать по Галактике от звезды к звезде, словно на перекладных, очень интригующая. В областях с высокой плотностью звезд количество таких захватов и перезахватов одной планеты может исчисляться десятками.

Инфракрасные детекторы помогают находить только молодые, еще не успевшие остыть, блуждающие планеты, излучающие в пространство много тепла. Пользуясь лишь этим методом, мы получим небольшую и, очевидно, весьма ограниченную выборку блуждающих планет. Большинство же из них, известных на настоящий момент, удалось обнаружить с помощью метода гравитационного микролинзирования.



Оливер Лодж

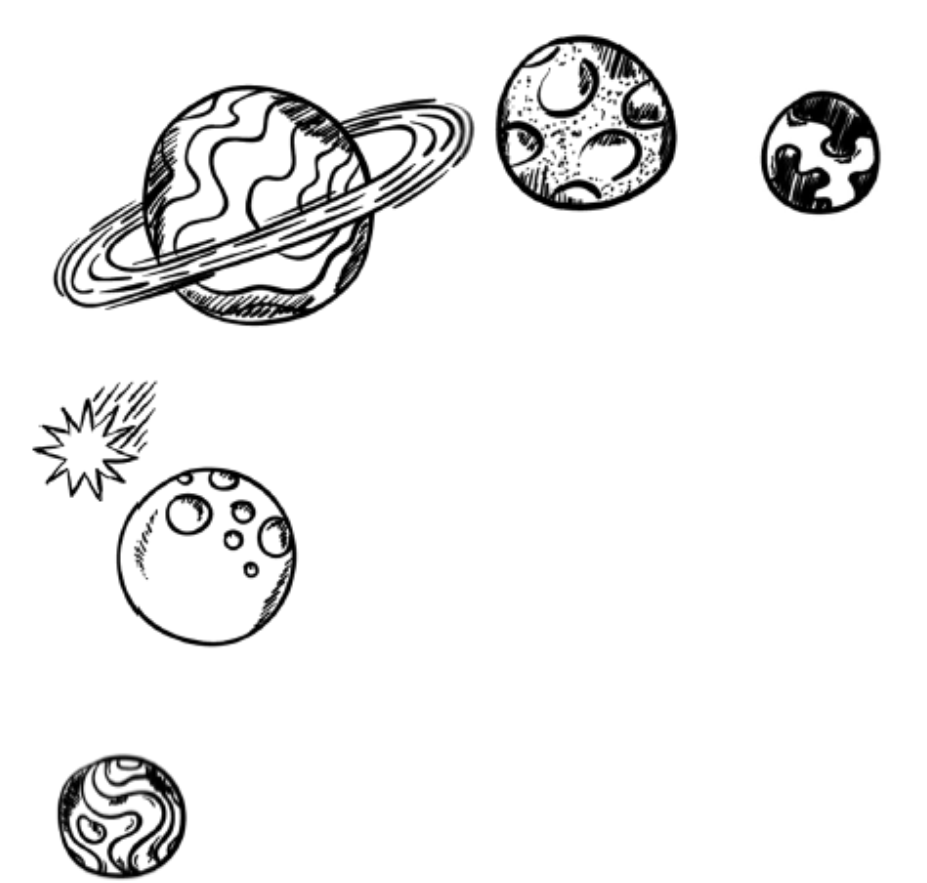
Явление природы, которое лежит в основе этого метода, было предсказано Альбертом Эйнштейном в рамках общей теории относительности. В соответствии с ней, когда луч света проходит вблизи любого массивного объекта, например звезды, галактики или скопления галактик, он отклоняется от прямолинейного пути. По выражению физика Оливера Лоджа, «гравитационное поле [звезды] действует как линза, но не имеет фокусной длины». В 1924 году русский физик Орест Хвольсон опубликовал работу, в которой показал, что отклонение луча света массивной линзой,

такой как галактика, позволяет далекому наблюдателю увидеть второе изображение источника, а в некоторых случаях, когда источник света, линзирующий объект, и наблюдатель находятся на одной прямой, источник превращается для наблюдателя в кольцо. Такие кольца принято именовать кольцами Эйнштейна, хотя сам Эйнштейн и не подозревал об их существовании. Редко можно услышать термин «кольца Хвольсона – Эйнштейна». Если же масса линзы небольшая, кольцо Эйнштейна вырождается в кратковременное повышение яркости источника – это так называемое событие микролинзирования. Поиск и исследование таких событий, используемых для измерения скрытых от наблюдателя масс, называется методом гравитационного микролинзирования.

Орест Хвольсон

Этот метод позволяет измерять некоторые характеристики звезд-линз, например их массу, с точностью, намного превышающей ту, какой можно достигнуть любым другим астрофизическим методом. И именно по этой причине метод гравитационного микролинзирования стал единственным способом, с помощью которого есть шанс обнаружить блуждающие планеты, похожие на Землю.

Нужна большая удача, чтобы наблюдатель с Земли увидел событие микролинзирования, вызванное блуждающей планетой, – такие явления очень редки и длятся всего 1–2 суток.



Сегодня существует два проекта, направленных на поиск событий микролинзирования, – *OGLE* и *MOA*[66]. Наиболее результативным из них пока является *OGLE*. Команда ученых во главе с Пшемеком Мрозом провела обработку 2 617 событий микролинзирования, зарегистрированных в проекте *OGLE* с 2010 по 2015 год, и выяснила, что 10 из них, вероятно, вызваны

блуждающими планетами[100]. Сам факт, что ученые вообще смогли обнаружить блуждающие планеты, указывает на то, что их число должно измеряться миллиардами. Лучше всего имеющуюся частоту наблюдений объясняют модели, в которых на каждые четыре звезды в Галактике приходится одна планета с массой Юпитера. Это говорит о существовании как минимум 50 миллиардов планет-бродяг. К ним мы должны прибавить блуждающие планеты земной массы, на наличие которых указывают события микролинзирования длительностью в половину суток или даже меньше. Они еще менее редки, чем события микролинзирования, вызванные планетами размером с Юпитер. Между тем команда Мроза выявила два таких события: в 2012 и 2018 годах. Сколько же тогда в Галактике блуждающих планет земной массы? Мроз дает осторожную оценку: «Свободно плавающие планеты земной массы встречаются в Млечном Пути чаще, чем звезды». И это согласуется с независимыми численными моделями, которые обсуждались в начале главы.

Ну а что можно сказать о спутниках блуждающих планет? Коричневый карлик *OTS* 44 был впервые обнаружен по его тепловому излучению в 1998 году в области активного звездообразования Хамелеон I[101]. Его масса, по приблизительным оценкам, составляет около 12 M_J, а значит, с большой вероятностью это не субзвездный объект, а самая настоящая блуждающая планета-гигант. Самым примечательным фактом является то, что этот объект окружен диском из пыли и газа массой до 0,63 $M_\oplus$. Я предлагаю вам переместиться в недалекое будущее этого объекта и пофантазировать о том, какие условия могут сложиться на его формирующихся сейчас спутниках.

Скорее всего, *OTS* 44 сформировалась за снеговой линией своей звезды, что обогатит часть ее будущих спутников водой. Некоторые из них наверняка имеют массу Энцелада или бóльшую, а масса других может достигать массы Земли. После образования в спутниках тяжелые элементы постепенно опускаются к ядру, а более легкие всплывают к коре. В конце концов около поверхности остаются легкие элементы, в том числе вода. Гравитационное возмущение, которое спутники оказывают друг на друга, никогда не позволит их орбитам стать абсолютно круглыми. То приближаясь к газовому гиганту, то удаляясь от него, они будут разогревать свои недра.

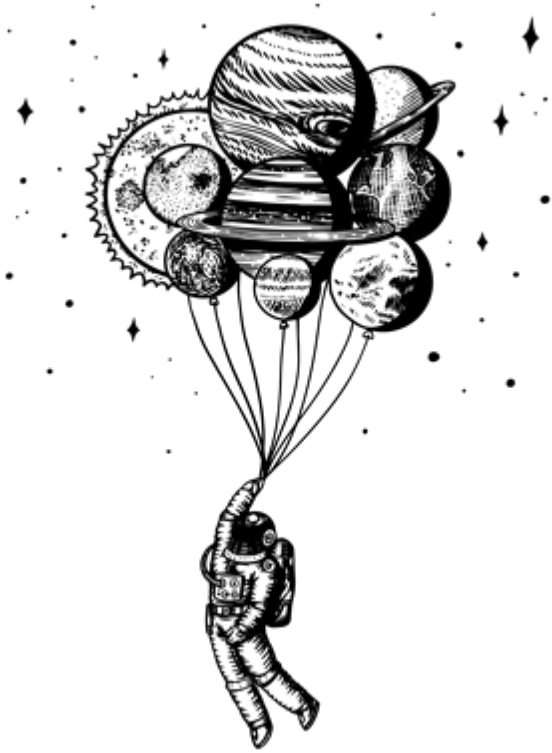
Слишком большой эксцентриситет орбиты вызовет слишком интенсивный разогрев спутников, и водяной лед с их поверхности испарится (как это произошло на 55 Рака *e* или на Ио, спутнике Юпитера). Если же эксцентриситет окажется почти нулевым, вся вода замерзнет. Пусть нам повезет, и у самого большого спутника

OTS 44 эксцентриситет будет как раз «впору». Тогда, напоминающий Европу или Энцелад, он весь будет покрыт ледяной оболочкой, а под ней спрячется океан жидкой воды.

Мы еще не понимаем, каков механизм зарождения жизни, но предположим, что в океане на этом спутнике она однажды возникнет. Ведь нет никаких известных нам препятствий этому. Энергию для жизнедеятельности организмы будут черпать не из света своего светила, а из тепла, поступающего из недр планеты. Подводные вулканы будут снабжать этот мир необходимыми минералами. Но самое главное, для эволюции неживой материи в живую здесь в запасе есть миллиарды и миллиарды лет. Ничто не сможет этому помешать: ни падение огромного метеорита, ни смерть родительской звезды (которой просто нет). Ученые с этой планеты, если на ней возникнет разумная жизнь, с горечью будут смотреть на Землю и ей подобные миры, хрупкие, подверженные стольким напастям… Честно говоря, будь у жизни выбор, где зародиться, она бы вряд ли выбрала планету, похожую на Землю.

Теплом, поступающим от расплавленного ядра, будет нагреваться как поверхность, так и атмосфера спутника (давайте предположим, что массы спутника хватит, чтобы ее удержать). Мы даже можем представить себе экзотический сценарий, в котором парниковый эффект оказывается настолько сильным, что растапливает поверхностные льды и высвобождает океаны. Жизнь, которая здесь возникнет, будет лишена глаз за ненадобностью, или же она увидит мир в инфракрасном диапазоне. Мир, всегда погруженный в ночь, без смены времен года. Под всегда подвижными и безо всяких созвездий небесами появится удивительная, необыкновенная природа.

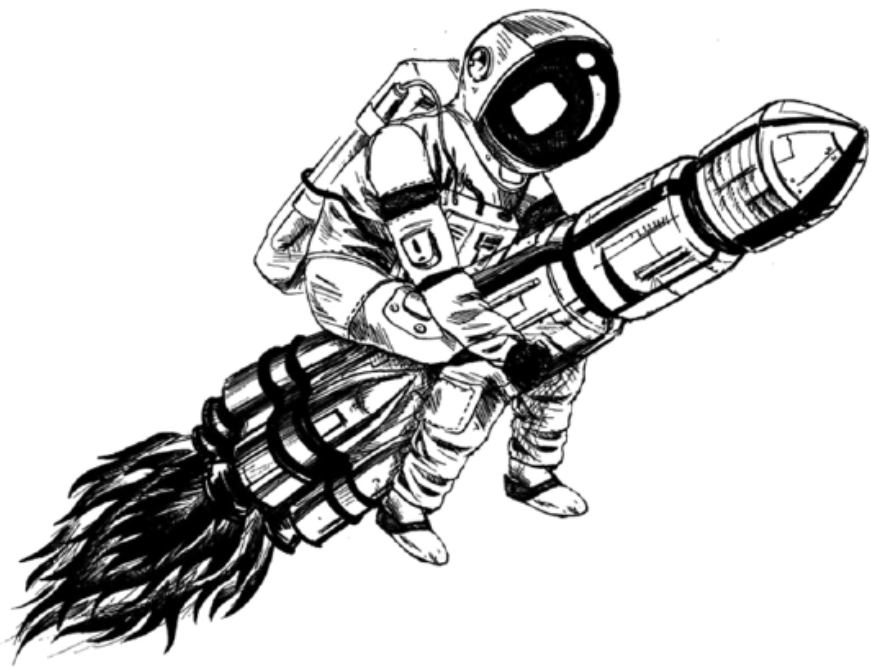
Существование блуждающих планет, их невероятное число, сравнимое с количеством звезд в Галактике и, возможно, лишь немногим уступающее количеству обычных планет, переворачивает наше представление о Млечном Пути и о том, в скольких его уголках может быть жизнь. Экзопланеты вокруг своих звезд уже не играют главную роль в этом спектакле жизни – они теперь на равных с несущимися в темноте Галактики планетами-бродягами.



Глава 13. Клайд Томбо и ледяные миры

Как я понял, он решил странствовать с перелетными птицами. В последнее утро он старательней обычного прибрал свою планету. Он заботливо прочистил действующие вулканы. У него было два действующих вулкана. На них очень удобно по утрам разогревать завтрак.

АНТУАН ДЕ СЕНТ-ЭКЗЮПЕРИ. МАЛЕНЬКИЙ ПРИНЦ



19 января 2006 года на ракете-носителе «Атлас-5» в космос была запущена исследовательская станция *NASA* «Новые горизонты». Первые две попытки запуска сорвались из-за отключения электричества и сильного ветра. Третья же

завершилась благополучно. Главная цель миссии состояла в первом в истории разведывательном пролете мимо Плутона – на тот момент еще девятой планеты Солнечной системы. Но помимо этого, предполагалось также изучение окружающей среды пояса Койпера и пролет мимо одного или нескольких принадлежащих ему объектов.

Пояс Койпера – это удаленная от Солнца на 30–50 а. е. область нашей звездной системы, заполненная каменисто-ледяными объектами. Сейчас их перечень включает более 2 000 тел (но в действительности их, конечно, намного больше). Внешняя его граница частично перекрывается так называемым рассеянным диском из ледяных объектов, движущихся по высокоэксцентричным орбитам. За рассеянным диском располагается гипотетическое облако Оорта – сферическая область пространства, окружающая Солнце и служащая источником долгопериодических комет.

Пояс Койпера получил свое название в честь астронома Джерарда Койпера, который в 1951 году предположил, что в начале эволюции Солнечной системы мог сформироваться пояс транснептуновых объектов. Есть некоторая ирония в том, что, согласно Койперу, к настоящему моменту этот пояс уже давно должен был быть рассеян массивным Плутоном. Однако Плутон в итоге оказался не таким уж массивным, а пояс существует по сей день. Большинство объектов пояса Койпера – каменисто-ледяные глыбы самых разных размеров[67]. Основная часть этих тел размером с комету (порядка 10 км), хотя имеются и довольно крупные экземпляры. По существующим оценкам, пояс Койпера включает в себя сотни тысяч объектов.

Как они туда попали? Крупные объекты не могли образоваться на столь большом расстоянии от Солнца – им просто не хватило бы вещества в протопланетном диске. Единственный вариант объяснить их существование – предположить, что некоторые из них сформировались на ранних этапах эволюции протопланетного диска на гораздо более близких дистанциях, смогли выжить во времена планетарной миграции, около 4 миллиардов лет назад, и были вынесены на дальние рубежи в результате гравитационных взаимодействий с газовыми гигантами.

15 июля 2015 года, после девяти лет полета, зонд «Новые горизонты» добрался до Плутона и прислал фотографии далекой карликовой планеты, на которых оказалась отчетливо видна область, по форме напоминающая сердце. Задолго до этого момента команда управления аппаратом начала выбирать следующую цель миссии. Окончательный выбор был сделан в

августе 2015 года – целью оказался транснептуновый объект с неофициальным названием Ультима Туле, позднее официально переименованный в Аррокот. Осенью того же года курс «Новых горизонтов» скорректировали и отключили двигатели аппарата на долгие годы. 1 января 2019 года он достиг новой цели. На фотографиях Аррокот предстал состоящим из двух как бы приклеенных друг к другу тел – проще говоря, похожим на снеговика. О том, что рассказали астрофизикам транснептуновые объекты и какое отношение это все имеет к экзопланетам, пойдет речь в настоящей главе.

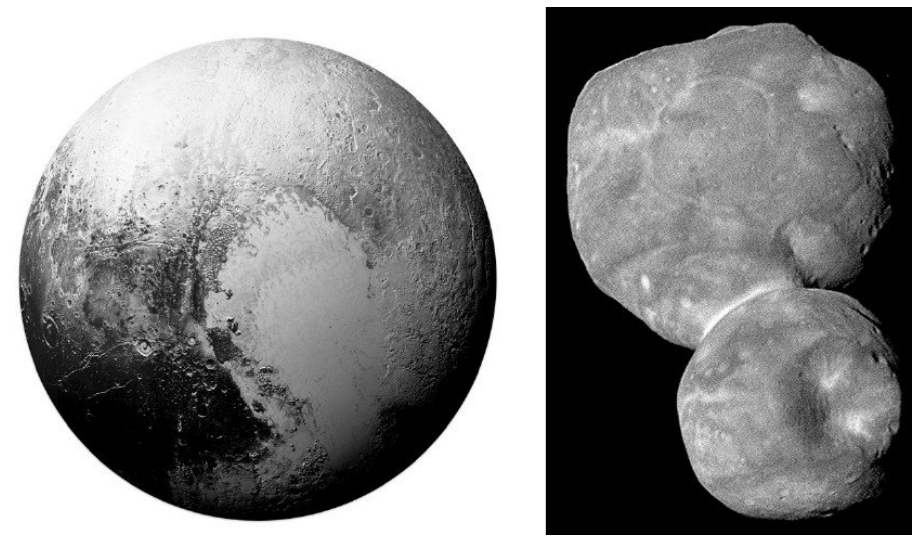


Рисунок 22. Изображения Плутона и Аррокота, полученные станцией «Новые горизонты»

Но сначала нужно сказать и еще об одном важном эпизоде этой истории. К задней части «Новых горизонтов» прикреплена маленькая капсула с надписью: «Здесь содержится прах американца Клайда У. Томбо, первооткрывателя Плутона и «третьей зоны» Солнечной системы, сына Адели и Мюрона, мужа Патрисии, отца Аннетт и Олдена, астронома, учителя, остряка и друга: Клайд У. Томбо (1906–1997)».

* * *

История открытия Плутона Клайдом Томбо неразрывно связана с именами Уильяма Гершеля и Персиваля Лоуэлла, о которых уже шла речь в предыдущих главах. Клайд Уильям Томбо родился 4 февраля 1906 года в семье фермеров в штате

Иллинойс, США. Уже в 12 лет он понял, что посвятит жизнь астрономии. Это произошло в ту самую ночь, когда его дядя, астроном-любитель, показал Клайду звезды и Луну в небольшой самодельный телескоп. Некоторые сюжеты повторяются в истории рефреном из столетия в столетие: маленький Иоганн Кеплер с матерью стоит на вершине холма, в ночном небе неподвижно висит комета. Восторг переполняет сердце мальчика. Пройдут сотни лет, и на другом материке маленький Клайд Томбо замрет у плохонького телескопа, завороженный видом лунного пейзажа. Кратеры, скалы и черные тени на желтом песке вдруг станут такими близкими – только протяни руку.

С тех пор все свободное время Томбо посвящал изучению астрономии. Он перечитал все книги по физике и астрономии, до которых смог добраться, а ночи просиживал у телескопа, разглядывая звезды. В выпускном альбоме одноклассники написали о нем: «Он откроет новый мир». Фраза стала пророческой. Это произойдет совсем скоро, хотя, казалось бы, все было против Клайда Томбо.

В колледж Томбо не пошел, остался на ферме – у родителей не было возможности оплатить его обучение. Работая от зари до зари на поле, юноша помогал семье, но ночами он продолжал заниматься астрономией. Мать с отцом этому не препятствовали. Однако для ночных наблюдений требовался телескоп, а для покупки нового не хватало денег. Тогда Томбо попробовал изготовить телескоп самостоятельно по инструкциям из журналов, и в конце концов у него это получилось. Для проверки стекол, которые приходилось шлифовать вручную, он вместе с отцом вырыл длинную яму глубиной 2 м. Она давала стабильную температуру и отличные условия для наблюдений. В 1927 году 7-дюймовый (~18 см) телескоп был готов. На нем Томбо впервые наблюдал комету Понса – Виннеке. В этом же году дядя купил у него этот телескоп и остался так впечатлен работой племянника, что незамедлительно отправил ему деньги на постройку нового, 9-дюймового (~23 см) телескопа.

Однажды ранним утром в ноябре 1928 года Томбо наблюдал Марс с помощью нового телескопа. Его изумлению не было придела, когда на поверхности Красной планеты он увидел полосы – те самые знаменитые каналы, о которых он читал в «Популярной астрономии», в отчетах о наблюдениях Марса, написанных сотрудниками Лоуэллской обсерватории.

Томбо очень хотел работать астрономом в обсерватории, но без университетского образования у него не было шансов. Ему исполнилось 22 года, и перед ним стояла дилемма: открыть свое дело по изготовлению телескопов или стать пожарным на

железной дороге. Но перед тем как сделать окончательный выбор, он отправил несколько рисунков Марса и Юпитера доктору Весто Слайферу, директору Лоуэллской обсерватории. Это была единственная обсерватория, занимающаяся изучением планет, о которой он знал.

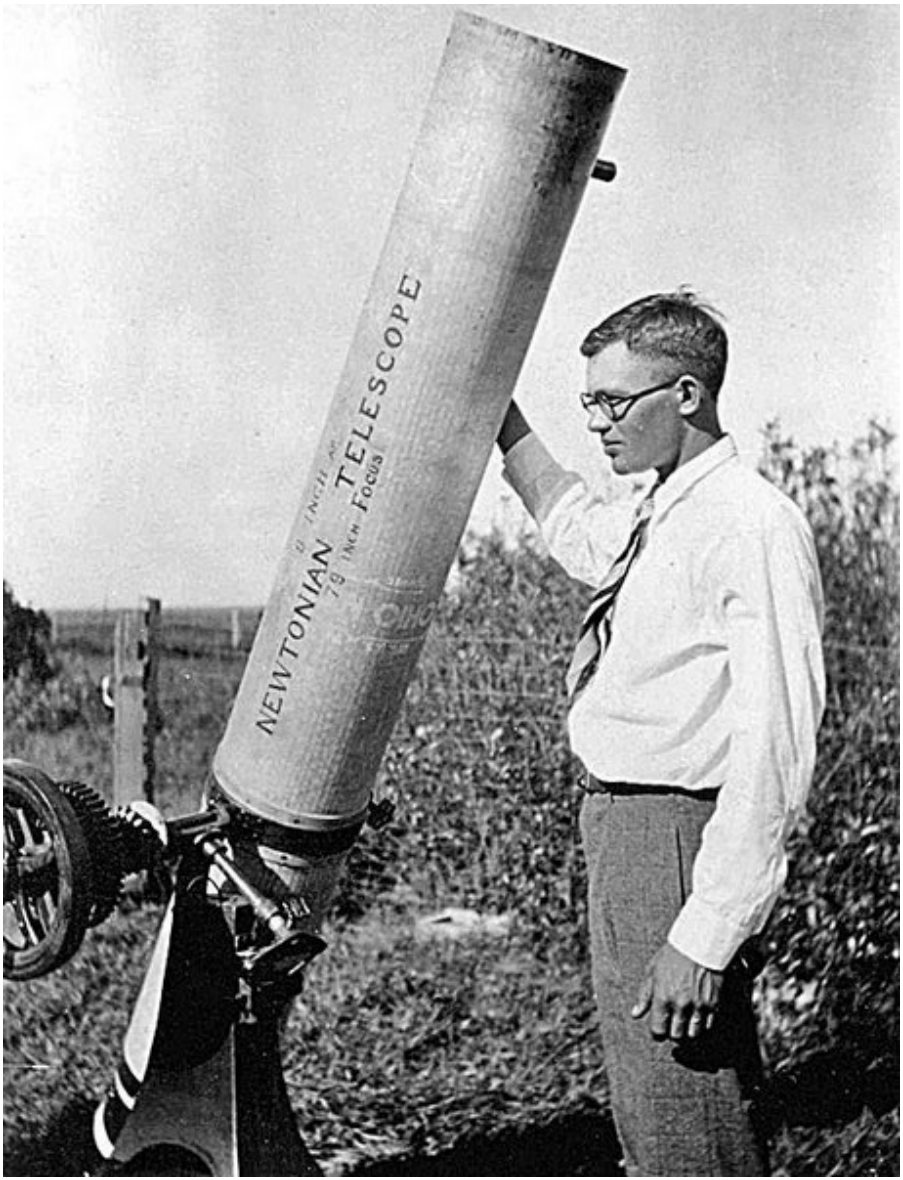


Рисунок 23. Клайд Томбо с собственноручно построенным 9-дюймовым рефлектором

Как раз в это время Слайфер искал подходящего человека для работы с новым 13-дюймовым (~33 см) рефрактором. После

непродолжительной переписки Слайфер спросил Томбо о состоянии его здоровья. Получив ответ, в котором Томбо оценил состояние своего здоровья как отличное, директор обсерватории написал, что готовится запуск в эксплуатацию нового фотографического телескопа, но ночная работа будет проходить в неотапливаемом куполе, и спросил Томбо: «Вас заинтересовало бы прибытие во Флагстафф через несколько месяцев, примерно в середине января?». Томбо был в восторге и отправился во Флагстафф на следующей же неделе. Ему невероятно повезло. Рефрактор с 13-дюймовым объективом фотокамеры, на котором ему предстояло работать, приобрели для поиска таинственной девятой планеты – «планеты X».

Ко времени описываемых событий Нептун, восьмая планета Солнечной системы, был открыт уже более 80 лет. В первой трети XIX века астрономы заметили аномалии в орбитальном движении Урана. Сначала их решили списать на возмущающее действие Юпитера и Сатурна. Но даже после того как были учтены все погрешности, вызванные притяжением газовых гигантов, необъяснимые возмущения орбиты оставались. Тогда возникла мысль, что столь странная орбита обусловлена присутствием еще неизвестной массивной планеты за орбитой Урана. В 1846 году французский ученый Урбен Леверье вычислил орбиту предполагаемой восьмой планеты и уговорил астронома Иоганна Галле воспользоваться его вычислениями для ее поисков. Нептун был обнаружен в первую же ночь наблюдений и именно там, где и предсказывалось. Французский физик и астроном Франсуа Араго назвал Нептун «планетой, открытой на кончике пера».

Но небольшие аномалии в движении Урана все равно оставались! К тому же их зафиксировали и у Нептуна. И тут вновь появляется оставленный нами в восьмой главе астроном Персиваль Лоуэлл. Изучая возмущения орбит Урана и Нептуна, Лоуэлл в 1905 году предположил существование транснептуновой планеты размером с Землю или даже больше, которую назвал *Planet X* – «планета Икс». В этом же году он даже вычислил ее орбиту. В течение последующих лет Лоуэлл несколько раз уточнял расчеты, и в 1915 году наконец опубликовал их и инициировал поиски планеты в своей обсерватории. Они, к сожалению, оказались безуспешными. В 1916 году Лоуэлл умер, и поиски планеты X прекратились. Возобновили их только после постройки рефрактора, способного делать фотографии неба.

В начале апреля 1929 года Клайд Томбо занялся поисками планеты X. Если девятая планета и существовала, то ее орбита должна была лежать в плоскости эклиптики, где лежат орбиты всех других тел Солнечной системы. Работа Томбо заключалась в

том, чтобы получать два снимка одной и той же области неба с интервалом в 3–5 дней, сравнивать их и искать объект, который изменил свое положение. И так одну область за другой вдоль всей эклиптики. Чтобы помочь себе сравнивать фотографии (а на каждой находилось по 16 000 звезд), Томбо использовал блинк-компаратор. Основой этого прибора является двойной микроскоп, позволяющий попеременно смотреть на одно и то же место на снимках. Это гораздо удобнее, чем метод, который использовал Гершель, ориентировавшийся лишь на свою внимательность и записи в журнале.

Работоспособность Томбо поражала сотрудников обсерватории – он работал по 12–14 часов ночью и днем. Но оно того стоило. 18 февраля 1930 года он, исследуя изображения неба в созвездии Близнецов, полученные 23 и 29 января, заметил одинокую звездочку, чуть изменившую свое положение. Последующая тщательная проверка однозначно доказала, что обнаруженное тело является неизвестной транснептуновой планетой. 13 марта 1930 года, ровно через 149 лет после открытия Урана Уильямом Гершелем, Лоуэллская обсерватория протелеграфировала остальным обсерваториям об обнаружении новой планеты. Открытие свершилось!

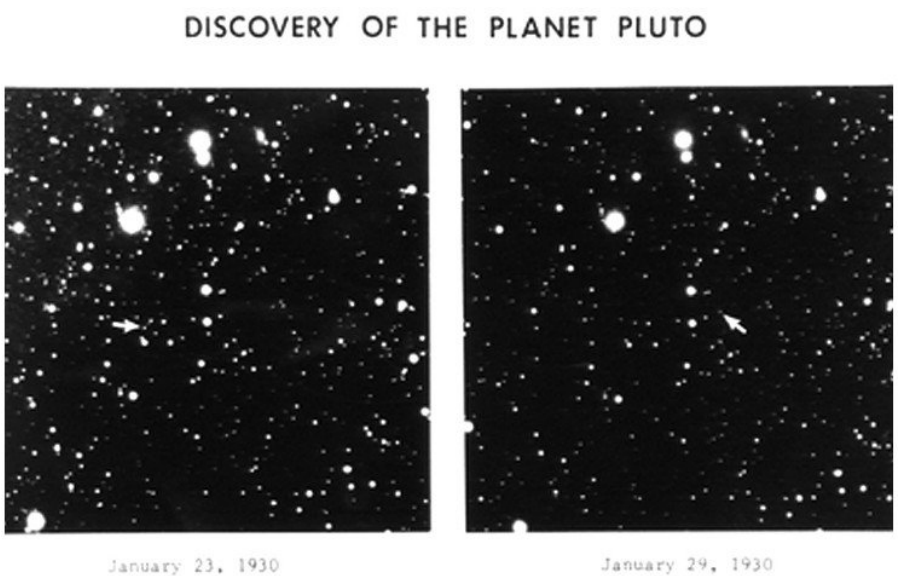


Рисунок 24. Исторические снимки, полученные Клайдом Томбо в январе 1830 года. Положение Плутона отмечено стрелками

Как выяснится чуть позже, Томбо обнаружил новую планету всего в 3° от того места, что предсказывал Лоуэлл. Кстати, позже

ее назовут Плутоном в том числе потому, что первые две буквы этого имени являются инициалами Персиваля Лоуэлла.

В отличие от Уильяма Гершеля, Томбо долгое время не признавал своей заслуги, считая, что ему просто повезло, и продолжал заниматься своей работой. Только теперь, после открытия Плутона, он сконцентрировался на поисках других возможных планет. Спустя два года он поступил в Канзасский университет, который благополучно окончил в 1936 году. До 1943 года Томбо работал в Лоуэллской обсерватории и продолжал исследовать небо. Он открыл несколько звездных скоплений, десятки галактик, сотни астероидов, переменных звезд и комет. После войны он устроился в Абердинскую баллистическую лабораторию в Лас-Крусесе и Университет Нью-Мексико, где работал вплоть до своей смерти в 1997 году, не дожив всего несколько лет до начала программы «Новые горизонты». Через сто лет после его рождения аппарат «Новые горизонты» унес одну унцию (28 г) его праха на дальние рубежи Солнечной системы, куда Томбо стремился всю жизнь и где теперь будет вечно странствовать.

В 1978 году был обнаружен Харон – самый крупный спутник Плутона. Изучение его орбитальных характеристик позволило достаточно точно определить физические характеристики Плутона. Он оказался очень своеобразным планетарным объектом. Например, его радиус (1 200 км) чуть больше, чем 2/3 радиуса Луны, а масса равняется примерно 20 % массы Луны. Стало очевидно, что Плутон вовсе не сопоставим с Землей, как думали до этого.

Это открытие возродило вопрос о том, что же вызывало необъяснимые возмущения орбиты Нептуна. И как оказалось, ничего! В 1993 году астрономы Лаборатории реактивного движения *NASA*, используя данные «Вояджера-2», уточнили значения масс Урана и Нептуна. Выяснилось, что масса Нептуна больше, чем считалось ранее. С новыми данными возмущения орбит планет-гигантов стали полностью соответствовать теории.

* * *

В 2006 году МАС выделил новый класс тел Солнечной системы – карликовые планеты. Еще раз напомню, что объект называется карликовой планетой, если лежит на орбите вокруг Солнца и имеет округлую форму, но неспособен очищать свою орбиту от мусора. Майкл Браун дал еще более понятное определение: «Лучшее описание, которое я могу придумать,

такое, что карликовая планета – нечто похожее на планету, но не планета». Самой известной карликовой планетой и одновременно самым известным объектом пояса Койпера является Плутон. Всего же в Солнечной системе пять карликовых планет: четыре расположены в поясе Койпера – Плутон, Эрида, Хаумеа и Макемаке, – а пятая, Церера, находится в Главном поясе астероидов между Марсом и Юпитером.

Съезду астрофизиков в 2006 году предшествовала целая череда открытий крупных транснептуновых объектов – о некоторых из них я упомянул в прошлой главе. Первый объект был обнаружен в 1992 году. Через год, в 1993-м, в *Nature* вышла статья, в аннотации к которой были следующие строки: «Здесь мы сообщаем об обнаружении нового объекта, 1992 *QB1*, расположенного за пределами орбиты Нептуна. Мы полагаем, это первое открытие члена пояса Койпера – предполагаемой совокупности объектов за пределами Нептуна, являющейся возможным источником короткопериодических комет»[102].

1992 *QB1*, позднее получивший имя Альбион, – один из целого множества классических обитателей пояса Койпера: крупных астероидов с характерными размерами больше 100 км (объектов меньшего размера, конечно, больше, однако мы их просто не видим в современные телескопы). Такие объекты неофициально называют «кьюбивано», что является немного измененным произношением *QB1*. Типичный кьюбивано – это астероид неправильной формы, орбита которого лежит в плоскости эклиптики и который не состоит в орбитальном резонансе с Нептуном. Наряду с кьюбивано в поясе Койпера есть также плутино – объекты, находящиеся в орбитальном резонансе с Нептуном.

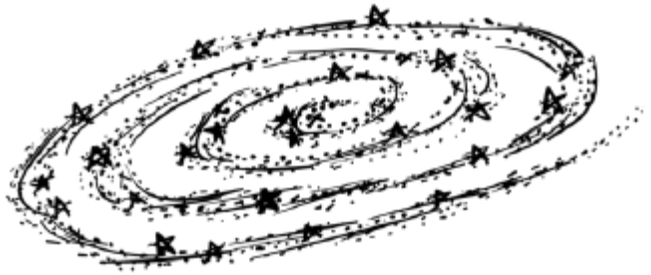
В большинстве своем кьюбивано и плутино – мертвые миры. Изучение таких объектов, их состава позволяет понять основные особенности эволюции и строения Солнечной системы. Так, Плутон – это наибольшая карликовая планета и плутино, а Макемаке – карликовая планета и кьюбивано. Есть, однако, еще много тел, которые соответствуют определению МАС для карликовой планеты, но не включены в официальный список. Например, кьюбивано Квавар, диаметр которого даже больше, чем диаметр официально признанной карликовой планеты Цереры – 1 100 км против 940 км.

Так сколько еще тел, не включенных в список карликовых планет, но соответствующих определению МАС, можно встретить в поясе Койпера? В более узком смысле вопрос следует поставить так: сколько объектов в поясе Койпера имеют сферическую форму, сформированную силами гравитации этих объектов? В

первую очередь необходимо понять, при каких размерах каменистого небесного тела силы гравитации начинают преобладать над силами сопротивления материала, из которого состоит объект. Самое простое, что можно сделать для оценки радиуса, – это посмотреть на известные объекты Солнечной системы. Наиболее крупный астероид из известных нам – Паллада – имеет диаметр 532 км и достаточно округлую форму, а второй по величине астероид, Веста, со средним диаметром 525 км уже напоминает мяч для регби. У Цереры, которую с 2006 года принято считать карликовой планетой, диаметр равен 940 км и форма определенно круглая. Однозначные выводы из этого сделать сложно, но, по всей видимости, большинство железокаменных объектов приходит в состояние гидростатического равновесия при размерах, лежащих в промежутке от 500 до 900 км.

Для объектов пояса Койпера эта граница, по логике, должна лежать ниже, так как в их составе меньше горных пород и больше легких элементов. Но насколько ниже? На сегодняшний день мы располагаем всего несколькими достаточно четкими изображениями транснептуновых объектов, полученными аппаратом «Новые горизонты», однако, имея в распоряжении лишь эти изображения, мы не можем ответить на поставленный вопрос. Поэтому стоит обратить внимание на близкие по составу и гораздо более изученные спутники планет-гигантов. Из них самый маленький, но уже имеющий округлую форму, – спутник Сатурна Мимас (тот самый, который открыл Гершель). Его диаметр всего 400 км. Все спутники планет-гигантов с бóльшим диаметром имеют сферическую форму, а форма тех, чей диаметр меньше, напоминает скорее огромные куски битого щебня. Так что давайте возьмем величину диаметра 400 км в качестве условной границы, отделяющей малые тела Солнечной системы от потенциальных карликовых планет.

Сегодня известно 60 транснептуновых объектов с диаметром больше 400 км в поясе Койпера и 20 объектов рассеянного диска, не принадлежащих ему. Ожидается, что полный обзор пояса Койпера увеличит это число вдвое. Это означает, что на окраинах Солнечной системы вращается полторы сотни таинственных миров, и мы не знаем о них ничего[68]. В нашей галактике, в других звездных системах, должно быть, множество планет, вращающихся на таких орбитах, на которых эти планеты получают ничтожно малое количество тепла родительской звезды. Плутон может служить отличным примером, точкой отсчета для изучения всех этих миров, что наверняка окажутся гораздо богаче и разнообразнее, чем мы себе представляем.



До 2015 года Плутон считался мертвым куском камня и льда на задворках Солнечной системы. И совершенно понятно почему. Днем Солнце хоть и выглядит с его поверхности гораздо ярче Луны, оно все равно дает ему совсем немного света – примерно столько же, сколько самая обычная лампочка. Количество энергии, которое получает Плутон вместе с этим светом, незначительно: оно не способно ни обеспечить условия для сколько-нибудь разнообразной химии, ни создать зоны с разными климатическими условиями, как на Земле или Марсе например. Температура на поверхности Плутона в среднем равна –230 ˚С. Кроме того, на этой карликовой планете не может быть никакой тектонической активности. Так, по крайней мере, считалось ранее. Тектоника, как вы помните, вызывается лишь наличием горячего ядра, которое еще не остыло с момента своего образования или же разогревается приливными силами. Для первого условия Плутону недостаточно массы, а для второго – не хватает рядом планеты-гиганта. Также Плутон не может сильно разогреваться за счет радиоактивного распада изотопов в своих недрах – тут, опять же, все упирается в массу (Земле, например, естественная радиоактивность дает около половины внутреннего тепла).

На фотографиях, сделанных зондом «Новые горизонты» в 2015 году, астрофизики впервые смогли рассмотреть Плутон в деталях. На них видна сложная, неоднородная поверхность с горными цепями, равнинами и снежными дюнами, подвергавшаяся в прошлом различным геологическим процессам. Плутон в основном покрыт льдами четырех веществ: воды, метана, азота и окиси углерода. Наиболее распространен здесь водяной лед: если исходить из плотности карликовой планеты, он составляет до половины ее объема – в этом смысле внутреннее строение Плутона напоминает строение спутников планет-гигантов. Также из сверхтвердого водяного льда состоят горы Плутона, достигающие 5 км в высоту.

Сюрпризом стало наличие у Плутона азотистой атмосферы, пусть очень разреженной, но все же способной производить ветра, поднимающие с поверхности частицы льда. Эти частицы затем осаждаются из атмосферы на поверхность, затвердевают и снова подвергаются эрозии – в общем, ведут себя так, как льды в полярных областях Земли. Разница между ними не качественная, а лишь количественная. К счастью, попасть в снежный буран на Плутоне нам с вами вряд ли представится возможность.

В верхней части знаменитого «сердца» Плутона, его назвали областью Томбо, есть участок поверхности, испещренный извилистыми линиями, гребнями и канавками длиной около 1 км. Эти образования, напоминающие горные массивы на Земле, проходят поверх ударных кратеров, что говорит об их относительной молодости. Встретить такое в замершем мире крайне удивительно. Очевидно, некая сила ответственна за их образование на Плутоне, однако до сих пор неясно, какая именно – возможно, это эрозия или даже потоки жидкого азота. В любом случае эти линии позволили ученым понять, что Плутон не мертв – это геологически живой объект!

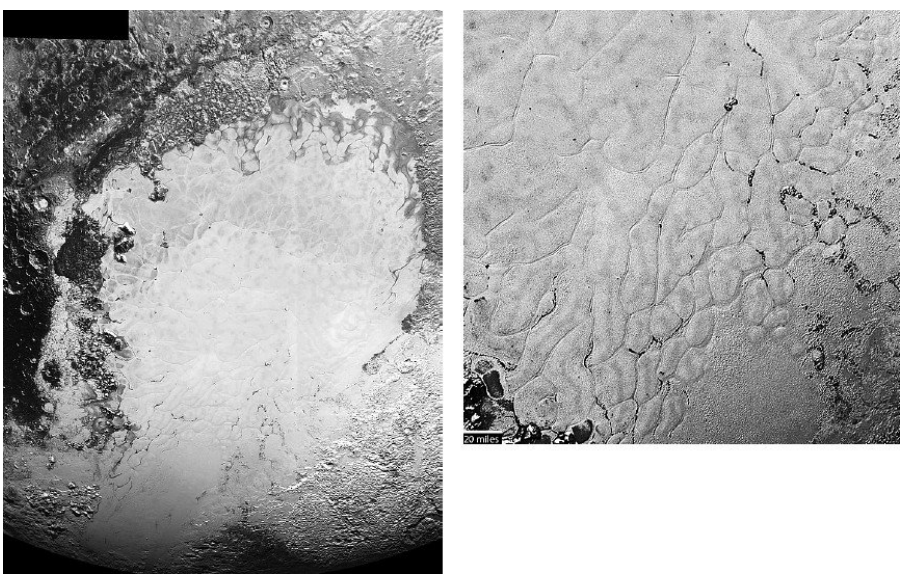


Рисунок 25. Участки ландшафта в области Томбо. Изображения получены с помощью станции «Новые горизонты»

Область Томбо – уникальное место. Западная ее часть, так называемая Равнина Спутника, заполнена слоем молодого богатого азотом льда, покрывающего водяную литосферу. Необычна и структура области. Ледяной азотистый панцирь поделен канавками глубиной около 100 м на неровные, чуть

приподнятые многоугольники шириной 20–40 км. Такая структура напоминает конвекционные ячейки, образующиеся на тонком слое масла на разогретой сковороде.

В очередной раз нам остается лишь догадываться о том, чем вызвана такая структура: возможно, мы здесь имеем дело с твердофазной конвекцией, происходящей за счет того, что более теплый лед поднимается в центр этих ячеек, а более холодный опускается по краям. Это очень захватывающе – ничего подобного вы не встретите во всей Солнечной системе. Согласно математическим моделям полный цикл такой ячейки может составлять от 100 тысяч до миллиона лет.

Окончательно представление о Плутоне как о мертвом, замершем мире разрушили ледники. Их обнаружили в горной местности вокруг и внутри Равнины Спутника. Они берут начало в горах и стекают в долину. Эти ледники невероятно молоды для такого небесного тела – им не более 10 миллионов лет. А в южной части карликовой планеты найдены – вы не поверите – два криовулкана!

Исследование географических особенностей Плутона – поистине увлекательнейшее занятие. Но больше всего загадок таит в себе не какая-нибудь деталь рельефа, а та сила, что обеспечивает энергией процессы, происходящие на Плутоне. Эта сила ответственна за достаточно высокие температуры, необходимые, чтобы растопить подповерхностный океан и способствовать созданию разнообразного рельефа.

Результатом действия этой силы, как считается, стал подповерхностный океан жидкой воды. Косвенным подтверждением этой гипотезы служит аммиак, найденный на поверхности Плутона. Молекулы аммиака могут быть легко разрушены ионной бомбардировкой и ультрафиолетовым излучением – всем тем, чего на этой карликовой планете в избытке. Так что наличие аммиака на поверхности говорит о том, что что-то постоянно доставляет его туда – например, криовулканы.

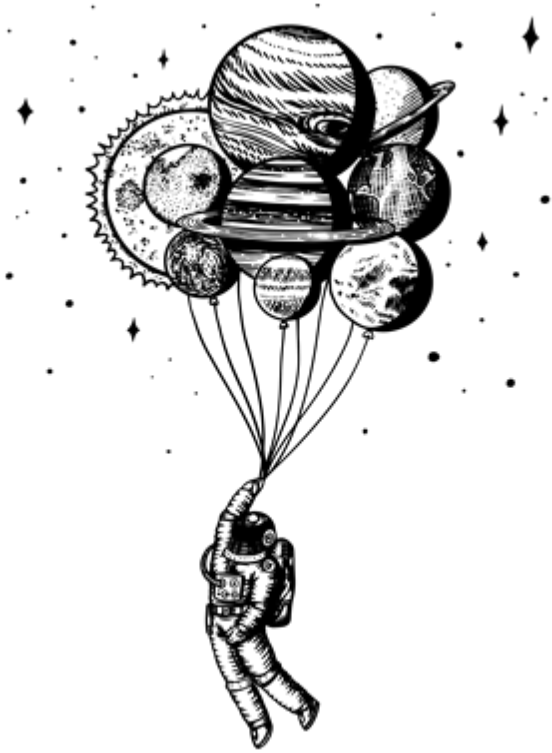
Если аммиак попал на поверхность из недр, значит, можно предположить, что он содержится в большом количестве и под поверхностью Плутона. Океан жидкой воды, насыщенный аммиаком, сложнее заморозить, а следовательно, его существование под поверхностью Плутона – не такая уж безумная идея. Сегодня астрофизики сходятся на том, что такой океан жидкой воды может располагаться под 200-километровой корой водяного льда и окружать каменное ядро диаметром в 1 700 км. Океан на Плутоне! Разве можно придумать что-то более поразительное?

Считается, что на Плутоне изначально было гораздо больше воды в жидком виде. Замерзая, она увеличивала толщину литосферы и уменьшала толщину подповерхностного океана. Этот процесс занял многие миллионы лет. Превращаясь в лед, вода расширялась, что отразилось на рельефе: на Плутоне хорошо заметны разломы, но совершенно нет следов сокращавшейся в прошлом коры.

Продвигаясь вглубь пояса Койпера, мы ожидаем встретить сотни объектов подобных Плутону. Уже сейчас мы знаем несколько десятков объектов, сопоставимых по размеру с этой карликовой планетой. Могут ли и под их поверхностями находиться океаны жидкой воды? Возможно, Плутон действительно самый крупный транснептуновый объект, возможно, мы найдем крупнее[69]. Как бы то ни было, мы не вправе исключать вероятность, что хотя бы часть существующих транснептуновых карликовых планет имеет подповерхностные океаны.

В каждой звездной системе, в которой происходили процессы образования планет, могут быть свои аналоги пояса Койпера. Если физика источника внутреннего тепла Плутона вполне ординарна и не требует уникального набора условий (например, близкого взрыва сверхновой звезды), тела, похожие на Плутон, с подповерхностным океаном, должны быть частым явлением на орбитах у далеких звезд.

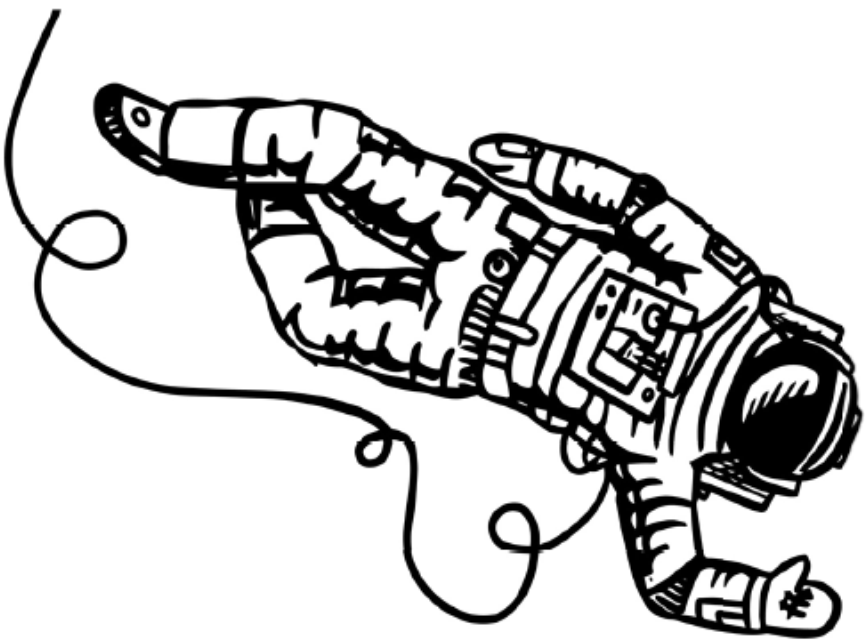
Такое распространение подповерхностных океанов в звездных системах не может не вызывать вопросы о том, могут ли эти океаны обеспечить выживание хотя бы земных микробов, не говоря уже о более сложных организмах. Мы поговорим об этом в последних главах, но вы уже сейчас можете пофантазировать на тему цивилизации, скажем, ракообразных или осьминогов в таком мире.



Глава 14. Суперземли и мини-Нептуны

Мы – невозможность в невозможной Вселенной.

РЭЙ БРЭДБЕРИ



До начала работы телескопа «Кеплер» в 2009 году экзопланеты открывали в основном с помощью наземных телескопов[70]. На момент первого сообщения о достоверно обнаруженной планете, пришедшего от команды «Кеплера», человечество знало уже более чем о 400 планетах, $^3/_4$ из которых удалось найти методом доплеровской спектроскопии. Транзитным методом было обнаружено около 50 объектов. Самыми неожиданными в популяции выявленных экзопланет стали горячие юпитеры. Но хотя именно их оказалось большинство, все понимали, что пока рано делать какие-либо выводы: тяжелые планеты вблизи своих звезд – легкая добыча при использовании метода радиальных скоростей, а все остальное ускользает от внимания.

Более честную статистику удалось получить только после

нескольких лет работы «Кеплера». Чувствительная аппаратура этого космического телескопа позволила увидеть даже маленькие экзопланеты, которые трудно обнаружить наземными телескопами. Оказалось, что наиболее многочисленный тип экзопланет – это планеты с радиусом в 2–4 $R_\oplus$ и массой до 10 $M_\oplus$. Эти планеты называются суперземлями. Их, как правило, находят в тесных многопланетных системах на близких к своим родительским звездам расстояниях, отчего их орбитальный период чаще всего не более 200 земных суток. В Солнечной системе таких планет нет. Что же они собой представляют?

Все планеты, которые мы встречали до этого, как вы уже наверняка успели заметить, можно отнести к одному из двух классов в зависимости от преобладающего в их составе материала: каменистые или газовые. Обычно при определении класса планеты у астрофизиков не возникает сложностей. Надо всего лишь взять ее массу, вычисленную по радиальной скорости звезды, и разделить ее на объем, который находится с помощью транзитного метода. Это дает нам среднюю плотность планеты, которая, в свою очередь, позволяет оценить состав планеты на основании физических моделей. Более того, часто, чтобы установить класс планеты, даже не обязательно знать и массу, и радиус. Хватит и одной из этих величин. Действительно, если вы нашли планету массой в 1,5 M_J она вряд ли будет иметь твердую поверхность, а если обнаружили планету с радиусом, равным радиусу Земли, то странно было бы ожидать, что эта планета окажется преимущественно газовой. Так, по крайней мере, казалось астрофизикам.

Масса и радиус экзопланеты измеряются с большей или меньшей погрешностью, зависящей от точности приборов и того, насколько аккуратно мы можем вычислить массу звезды. Неприятность с объектами, которые в таком большом количестве обнаружил телескоп «Кеплер», состоит в том, что они, имея один и тот же размер или одну и ту же массу, могут принадлежать к двум разным классам! Иногда случается такое, что изначально вычисленная плотность планеты указывает на газовый мир, а немного уточненная – переводит эту же экзопланету в разряд скалистых суперземель. Бывает и наоборот. Эти планеты как бы находятся на границе между газовыми и каменистыми планетами и готовы перескочить на любую сторону.

Но все же некоторые эмпирические выводы сделать можно. В большинстве своем планеты с радиусом до 2 $R_\oplus$ относятся к скалистым суперземлям, а те, что имеют более крупные размеры, представляют собой газовые суперземли – их называют мини-Нептунами[103]. Мини-Нептуны Глизе 436 *b* и Глизе 1214 *b* имеют

радиусы бóльшие, чем 2 $R_\oplus$ (4,21 и 2,68 $R_\oplus$), и массы 23,20 и 6,55 $M_\oplus$ соответственно. Вычисление объемных плотностей дает значения 1,69 г/см^3 для Глизе 436 *b* и 1,87 г/см^3 для Глизе 1214 *b*, и это лишь немного больше, чем плотности Урана и Нептуна (1,27 и 1,63 г/см^3). Планетарные модели предсказывают, что эти экзопланеты содержат значительное по объему количество водорода, гелия и паров воды – типичные мини-Нептуны. У некоторых мини-Нептунов плотности даже меньше, чем 1 г/см^3. С другой стороны, большинство скалистых суперземель, например *CoRoT*-7 *b, Kepler*-10 *b* и *Kepler*-36 *b*, с радиусами менее 2 $R_\oplus$, имеют плотность, соответствующую железоникелевым породам (6–10 г/см^3).

Может сложиться впечатление, что планета, достигнув 1,5–2 $R_\oplus$, становится достаточно массивной, чтобы накопить плотную атмосферу из водорода и гелия и впоследствии превратиться в мини-Нептун или газовый гигант. Однако это лишь закономерность, полученная из статистического анализа, но не правило. Наша Вселенная была бы довольно скучным местом, если бы все закономерности в итоге оказывались законами. Но нет – она умеет удивлять. Например, планета *Kepler*-411 *b* при радиусе 2,4 $R_\oplus$ имеет плотность больше плотности железа – 10 г/см^3.

Большая часть экзопланет обнаружена у красных карликов (вспомните о 55 Рака *B*, Гамме Цефея *B* или Проксиме Центавра) – и понятно почему. Во-первых, красные карлики – это самый распространенный тип звезд в Млечном Пути. Они составляют около $^1/_3$ звездной массы Галактики и примерно $^2/_3$ всех ее звезд. Некоторые специалисты утверждают, что 85 % звезд в Млечном Пути являются красными карликами. Таким образом, если всего в Галактике 250 миллиардов звезд, то как минимум 170 миллиардов из них – это красные карлики, и вокруг многих из них можно встретить суперземли. Что может показаться

неожиданным, так это то, что невооруженным глазом на ночном небе видны звезды всех классов, кроме красных карликов – при такой-то их распространенности. Однако красные карлики – это очень тусклые звезды. Их свет, преодолевший гигантские расстояния, человеческий глаз уже не способен различить.

Во-вторых, существует чисто техническая причина. В первой главе мы говорили о том, что красные карлики – самые маломассивные звезды главной последовательности. Протопланетные диски, которые они формируют возле себя, небольшие, а планетные системы очень тесные. Следовательно, орбитальные периоды их экзопланет, как правило, короткие, а амплитуды радиальных скоростей, если эти экзопланеты имеют массу, сравнимую с земной, легко можно зарегистрировать с помощью современной аппаратуры.

Но о красных карликах я заговорил по другой причине. Дело в том, что наибольшее число суперземель в зоне обитаемости было обнаружено именно у красных карликов. Зона обитаемости представляет собой кольцеобразную область вокруг звезды, и на поверхности каменистых планет, расположенных внутри этой зоны, могут существовать устойчивые резервуары с жидкой водой – серьезная заявка на то, чтобы стать живым, обитаемым миром.

Но здесь следует предостеречь от неправильных выводов. Нужно четко понимать, что планета в зоне обитаемости не обязана иметь воду, не говоря уже об обитателях. Причин, по которым на такой планете может не быть устойчивых водоемов, очевидно, гораздо больше, чем тех, по которым она может там оказаться. Например, если планета похожа на Венеру и в ее атмосфере ярко выражен парниковый эффект, то вблизи поверхности может быть слишком жарко, и в жидкой форме на ее поверхности способен будет находиться разве что свинец. Или если она напоминает Марс – планету, практически лишенную атмосферы, а потому являющуюся холодной безводной пустыней. Факт пребывания планеты в зоне обитаемости значит, что при наличии подходящей атмосферы средняя температура на поверхности этой планеты где-то между 0 и 100 ˚C.

Однако первая экзопланета, орбита которой лежит в зоне обитаемости, была найдена не у красного карлика, а у солнцеподобной звезды в 587 св. годах от Солнца. *Kepler*-22 – родительская звезда планеты, о которой идет речь, – обладает на 25 % меньшей светимостью, чем Солнце. Ее единственная достоверно обнаруженная планета *Kepler*-22 *b* находится на расстоянии, составляющем примерно 85 % от расстояния между Землей и Солнцем[104]. Используя транзитный метод, удалось рассчитать радиус *Kepler*-22 *b*: он равен 2,4 $R_{\oplus}$, что позволяет

отнести экзопланету к классу суперземель. А вот точно определить массу *Kepler*-22 *b*, измерив радиальную скорость звезды *Kepler*-22 с помощью спектрометра в обсерватории Кека, к сожалению, не получилось. Известно лишь, что она не превышает 124 $M_\oplus$ (скорее всего, намного меньше). Основываясь на характеристиках родительской звезды и полагая альбедо планеты равным земному, можно вычислить температуру поверхности планеты, какую она имела бы, не будь у нее атмосферы (эта температура называется равновесной температурой поверхности). Она равна –11 ˚C. Но много ли нам это дает? На Земле равновесная температура равна –18 ˚C. Тем не менее круглый год мы не ходим в валенках, потому что парниковые газы в нашей атмосфере способствуют увеличению температуры в среднем до 15 ˚C.

Главный вопрос – состав атмосферы *Kepler*-22 *b* и величина ее парникового эффекта. Именно эти знания помогут понять условия на поверхности планеты и выяснить, существуют ли на ней водоемы. В условиях, когда данные, полученные из наблюдений, могут соответствовать разным мирам, астрофизики используют методы теории вероятностей, чтобы предсказать наиболее возможные характеристики исследуемой экзопланеты. Один из них состоит в следующем: на компьютере генерируется как можно больше вариантов системы звезда – компаньон (в роли последнего может быть планета или другая звезда) с различными массами и орбитами компаньона, а затем рассчитываются кривые блеска, которые получит наблюдатель с Земли в том случае, если его приборы будут идеальными. Далее реальная и рассчитанные кривые сравниваются между собой и вычисляется вероятность, с которой каждая рассчитанная кривая может превратиться в реальную с учетом погрешностей измерительных приборов. Мы не знаем, как эти погрешности взаимодействуют между собой, поэтому за редкими исключениями не можем исключить ни одну из конфигураций звезда – компаньон. Но каждая из конфигураций имеет свою вероятность. Суммируя эти вероятности, мы можем предсказывать характеристики планет, а самое главное – давать оценку своей уверенности в том или ином исходе.

Используя подобный подход, можно выяснить, например, что для *Kepler*-22 *b* существует вероятность лишь 0,3 %, что ее масса превысит 124 $M_\oplus$; 95 % – что она меньше 82 $M_\oplus$, и 68 % – что меньше 36 $M_\oplus$. К сожалению, почти на 100 % исключается землеподобный состав планеты – скорее всего, это газовый гигант. *Kepler*-22 *b* стал первым обнаруженным мини-Нептуном.

Даже несмотря на то что экзопланета *Kepler*-22 *b* совершенно

не похожа на Землю, ее открытие было воспринято с большим энтузиазмом и вызвало оживленные дискуссии в научном сообществе. Конечно, всех волновал вопрос, могут ли на *Kepler*-22 *b* сложиться условия, подходящие для существования жизни. На волне активных обсуждений популярное мнение озвучила Натали Баталья, ученый-исследователь, член команды телескопа «Кеплер»: «Если эта планета представляет собой в основном океан с небольшим скалистым ядром, то не исключено, что в таком океане может быть жизнь».

Ключом к пониманию внутреннего устройства экзопланет служит их средняя плотность. Если значение средней плотности суперземли оказывается меньше или сравнимо с плотностью воды, то перед нами мини-Нептун. Если же средняя плотность больше плотности воды – уверенно говорить об устройстве планеты сложнее. С одинаковой вероятностью это может быть и мини-Нептун с каменистым ядром, и планета-океан.

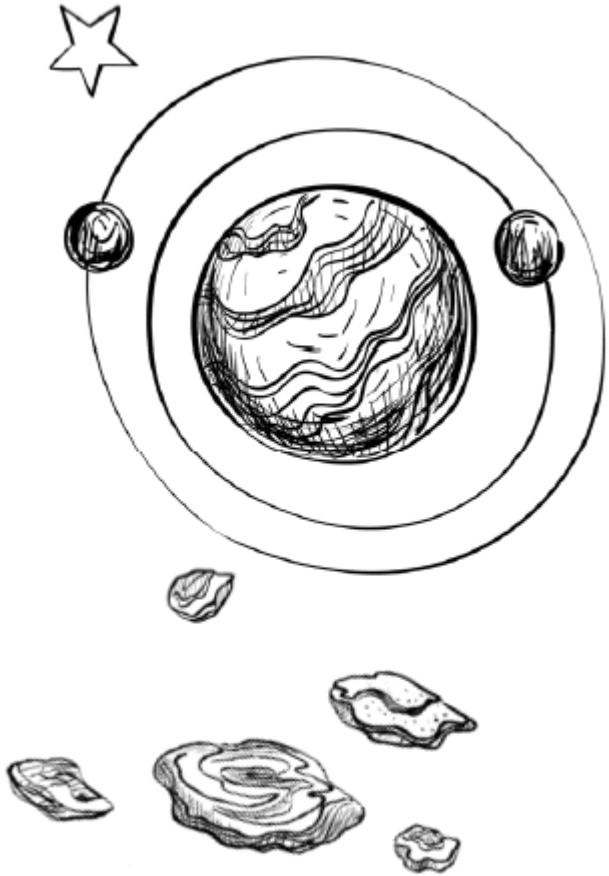
Многие привыкли думать, что Земля, наша голубая планета, имеет огромные запасы воды. Это так, конечно, но только если мерой выступают потребности людей. Хотя на поверхности Земли, в океанах и полярных шапках сконцентрированы большие запасы воды, они составляют лишь 0,05 % массы Земли. Но что может представлять собой планета, масса воды которой в 10–100 раз больше, чем у Земли?

Если температура на планете ниже температуры замерзания воды, то она покроется коркой льда. Такая планета могла бы промерзнуть насквозь, если бы не ее внутренние источники тепла: жар, оставшийся со времен ее образования, и тепло от распада радиоактивных элементов. Они будут подогревать океан, замедляя процесс замерзания или не давая ему продолжаться. Условия на такой планете не сильно отличаются от тех, что сложились на ледяных лунах Юпитера и Сатурна. А если постепенно перемещать ее ближе к родительской звезде, то климат будет становиться все теплее и теплее. Когда планета окажется на орбите, находящейся в зоне обитаемости, ее льды растают и она полностью покроется жидкой водой. Этот условный тип планет принято называть планетами-океанами. Перемещая такую планету еще ближе к звезде, мы увидим, что вода на ней начнет интенсивно испаряться. И она станет похожей на горячую влажную баню.

Сегодня известно как минимум о шести экзопланетах, которые, вероятно, являются водными мирами. Первой такой планетой, обнаруженной в декабре 2009 года, стала Глизе 1214 *b* в 42 св. годах от Земли[105]. Также она является первой суперземлей (2,7 $R_{\oplus}$), найденной на орбите вокруг красного

карлика. Эту планету открыли транзитным методом, с помощью спектрографа *HARPS* удалось точно измерить ее массу (6,55 $M_{\oplus}$). Вычисление средней плотности планеты дало значение 1,9 г/см^3 – слишком большое для мини-Нептунов, но слишком маленькое для каменистой планеты. Хорошо объясняет такую плотность смешанный состав экзопланеты: небольшое каменное ядро и газовая и/или водяная оболочка, покрывающая всю планету на тысячи километров вглубь.

В 2014 году была предпринята попытка изучить атмосферу Глизе 1214 b с помощью телескопа «Хаббл»[106]. Теоретически это делается довольно просто: из спектра звезды, принятого, когда планета находится за звездой, вычитается спектр звезды в момент транзита. Оказалось, спектр атмосферы Глизе 1214 b не имеет никаких отличительных черт. Это значит, что, скорее всего, планета покрыта густыми непрозрачными облаками. Загадка этого мира до сих пор не раскрыта. Сегодня мало кто из ученых считает, что на Глизе 1214 b действительно есть океан: более вероятно, что эта экзопланета – типичный мини-Нептун. Хотя точный ее состав неизвестен. Однако что, если Глизе 1214 b – действительно водный мир? Каким этот мир предстанет перед исследователями?



Пробравшись сквозь эти густые непрозрачные облака, мы попадем в очень горячую и плотную паровую атмосферу. Давление будет нарастать по мере того, как мы спускаемся все ниже, пока перед нами не предстанет безбрежный океан. Но вот мы ныряем в него и стремимся все глубже к недрам планеты – так глубоко, как никто из исследователей никогда не проникал даже в недра Земли. Если мы найдем жизнь на Глизе 1214 *b* или подобном ей водном мире, это будет биосфера, возможно, чем-то напоминающая земную океаническую биосферу. Чем глубже мы продвигаемся, тем более высоким становится давление. Постепенно вода перестанет напоминать жидкость, к которой мы привыкли на Земле: сначала она перейдет в состояние, которое физики называют сверхтекучей жидкостью, а потом – в плазму[71]. В центре планеты располагается каменное ядро, погруженное в силикатную мантию.

А теперь давайте отправимся на *Kepler*-186 *f*[107]. Эта экзопланета была обнаружена в 2014 году в системе красного

карлика, находящегося в 490 св. годах от Солнца в созвездии Лебедя. *Kepler*-186 *f* – первая найденная планета земного размера, чья орбита лежит в зоне обитаемости, и поэтому она стала сенсацией. До сих пор ее считают одним из наиболее вероятных претендентов на обнаружение там внеземной жизни.

Как всегда, начну с перечисления некоторых фактов. Как видно уже из названия, *Kepler*-186 *f* обнаружили с помощью космического телескопа «Кеплер». Год на этой планете длится 130 земных суток, а большая полуось ее орбиты примерно совпадает по длине с большой полуосью орбиты Меркурия и равна 0,43 а. е. Возраст *Kepler*-186 оценивается примерно в 4 миллиарда лет, что даже меньше, чем существует наша Солнечная система. Светимость *Kepler*-186 равна всего 4 % светимости нашего Солнца, из-за чего планета получает лишь треть тепловой энергии, которую Солнце дает Земле. Равновесная температура планеты равна 85 °C. Исходя из оценок светимости ее родительской звезды и «проседания» блеска звезды во время ее транзита, можно вычислить радиус *Kepler*-186 *f*: он чуть больше земного – 1,2 $R_\oplus$. Поскольку радиус планеты значительно меньше 2 $R_\oplus$ – числа, которое, по всей видимости, является критическим для формирования мини-Нептунов, мы с большой долей уверенности можем предполагать, что *Kepler*-186 *f* представляет собой скалистую суперземлю.

Колебания радиальной скорости звезды *Kepler*-186 обнаружить не удалось, а следовательно, не удалось определить и массу планеты. Но давайте предположим, что состав *Kepler*-186 *f* схож с земным. Почему бы и нет? Тогда ее масса приблизительно равна 1,4 $M_\oplus$. По крайней мере, при таком значении понятно, почему исследователи не смогли вычислить массу планеты. Если мы правы, то колебания радиальной скорости родительской звезды, которые вызовет *Kepler*-186 *f*, будут иметь амплитуду, равную всего нескольким десяткам сантиметров в секунду. На сегодняшний день такая точность измерений остается для нас недостижимой. Только самые лучшие из следующего поколения телескопов, например *ELT*, как ожидается, смогут справиться со столь малыми значениями радиальных скоростей.

На этом более или менее достоверные факты заканчиваются. Дальнейшие рассуждения представляют собой некую спекуляцию, игру ума. С большой вероятностью за время, прошедшее с момента образования планеты, внутренние слои *Kepler*-186 *f*, подогреваемые радиоактивным распадом, еще не успели остыть, поэтому будущие исследователи могут обнаружить на планете тектонику плит, вызванную движением магмы, и магнитное поле. Давайте предположим, что это магнитное поле достаточно

сильное, чтобы на столь близкой орбите защитить атмосферу *Kepler*-186 *f* от интенсивных потоков звездного ветра. Мы ожидаем, что атмосфера сформирована таким же образом, как и у других каменистых планет, – за счет геохимических процессов вследствие тектонической активности, а не за счет захвата газа из протопланетного диска. Поэтому такая атмосфера содержит большое количество углекислого газа, азота и воды. А это значит, что на планете должен быть значительный парниковый эффект. Мы не знаем точный состав атмосферы, ее массу, но простые климатические модели говорят, что нет никаких принципиальных препятствий, чтобы парниковый эффект поддерживал температуру поверхности *Kepler*-186 *f* выше 0 °C. Если состав планеты схож с земным, то на планете так же мало воды, в процентном соотношении, как и на Земле.

На способность планеты собирать на своей поверхности воду в устойчивые водоемы и поддерживать температурный баланс оказывает влияние огромное число факторов и процессов. К ним относятся свойства планеты, планетной системы и звезды (такие как особенности звездного спектра, активность звезды и интенсивность звездных ветров, возраст, интенсивность рентгеновского и ультрафиолетового излучения и наличие звезд-компаньонов) и то, какое влияние друг на друга они оказывают с течением времени. Некоторые из этих факторов, скажем наличие звезды-компаньона, могут создавать весьма причудливые природные условия на планете. Другие, такие как спектр и светимость звезды, меняются с увеличением ее возраста. На одной и той же планете на протяжении миллиардов лет могут складываться совершенно разные климатические условия. Земля в начале своей геологической истории имела непрозрачную плотную горячую атмосферу, но были и периоды, когда она полностью покрывалась льдом[72].

Давайте подумаем, какие из этих факторов имеют ключевое значение для жизни на планетах, находящихся у красных карликов? Если вы вспомните о Проксиме Центавра *b*, то наверняка назовете звездную активность. Но тут стоит иметь в виду, что *Kepler*-186 – спокойная звезда. За все время наблюдений не было зафиксировано ни одной вспышки, сопоставимой по мощности со вспышкой 2017 года на Проксиме Центавра. Даже если мощные вспышки на *Kepler*-186 иногда случаются, толстая атмосфера и магнитное поле, предположительно, могут защитить биосферу (если она, конечно, там есть).

Еще одно потенциальное препятствие для жизни – приливный захват планеты. Такое явление должно быть распространено на экзопланетах, находящихся на близких орбитах вокруг своих

звезд. Многие из экзопланет, расположенных в зоне обитаемости красных карликов, могут быть приливно заблокированы. На одной половине планеты в этом случае будет вечный день, на другой – вечная ночь. Одно время считалось, что на таких экзопланетах бушует постоянный ураган, на дневной стороне идет непрекращающийся дождь, а на ночной – царит вечная зима[108]. Такой климат делает сложную жизнь маловероятной. Дальнейшие же исследования показали, что это всего лишь эффект одномерных климатических моделей. Более сложные, трехмерные, модели демонстрируют, что на таких планетах возможен эффективный теплообмен в атмосфере, уменьшающий разницу между температурами ночной и дневной сторон и в целом делающий этот мир не таким уж ужасным местом[109].

Разобравшись с тем, что способно помешать существованию жизни, подумаем и о том, что может поддерживать потенциальную биосферу на *Kepler*-186 *f* и похожих на него мирах. Время жизни родительских звезд? Безусловно. В этом состоит еще одна причина особого внимания ученых к планетам у карликов *M*-типа. *Kepler*-186 *f* находится не просто в зоне обитаемости своей звезды, а в зоне постоянной обитаемости. Это означает, что планета должна не только поддерживать условия для существования водоемов на ее поверхности, но и поддерживать их на протяжении миллиардов лет. Например, еще задолго до того как Солнце станет красным гигантом, океаны Земли испарятся и вся сложная жизнь на ней исчезнет. Земля будет постепенно вытесняться из зоны обитаемости. Это произойдет примерно через миллиард лет из-за повышения температуры и яркости нашего светила. Однако красные карлики эволюционируют очень медленно, в сотни раз медленнее Солнца. Планета, которая образовалась у звезды такого типа в зоне обитаемости, будет оставаться там сотни миллиардов или даже триллионы лет, причем практически при одних и тех же температурных условиях!

Первые живые организмы на Земле появились около 4 миллиардов лет назад. На протяжении долгого времени нашу планету населяли лишь бактерии. Жизнь больше напоминала зеленую слизь из фильмов про пришельцев, чем привычных нам животных и растений. Где-то между 2,1 и 1,8 миллиарда лет назад произошло событие, которое все изменило: появилась первая клетка с ядром (первый эукариот). Это стало революцией в мире микроорганизмов. И с этих пор жизнь начала усложняться. Все многоклеточные организмы, которых мы знаем, являются эукариотами – потомками той первой клетки. Не факт, что будь у нас возможность отмотать пленку на 2 миллиарда лет назад и

запустить все с самого начала, то снова появились бы эукариоты. По прошествии 4 миллиардов лет жизнь все так же могла бы представлять собой зеленую слизь[73]. Земле повезло, но везет ли так другим мирам? Красные карлики предоставляют экзопланетам сотни миллиардов лет на эксперименты с жизнью.

Пусть на дворе стоит осень 2100 года, вы залюбовались плакатом туристического агентства *NASA* и вот уже сами не понимаете, как оказались в звездолете, который с минуты на минуту высадит вас на *Kepler*-186 *f*. Что вы увидите в иллюминатор, совершая последний перед посадкой облет планеты? Ни лесов, ни лугов на планете нет. Эволюция их еще «не придумала». Поверхность покрывают лишь примитивные лишайники. Но какую поверхность! С высоты звездолета вы видите, что на планете нет хребтов, гор – да и вообще, вам кажется, что она невероятно плоская. Повсюду то ли ветвящиеся и расползающиеся по поверхности океана острова, то ли гигантские и многочисленные озера, разбросанные в беспорядке, зажатые «пальцами» суши. Ничего хоть чем-то напоминающего материки Земли. Мир-архипелаг. Конечно, этому есть объяснение, говорите вы себе. Плотная атмосфера усилила разрушительное действие ветров, эрозия оказалась более быстрой, чем на Земле, все горы превратились в песок еще до того, как успели вырасти, и океаны вышли за пределы своих бассейнов и затопили экзопланету.

Разумеется, никаких подтверждений описанной выше картине нет, но она не противоречит имеющимся у нас представлениям об эволюции суперземель. А значит, возможна если не на *Kepler*-186 *f*, то на какой-нибудь другой суперземле.

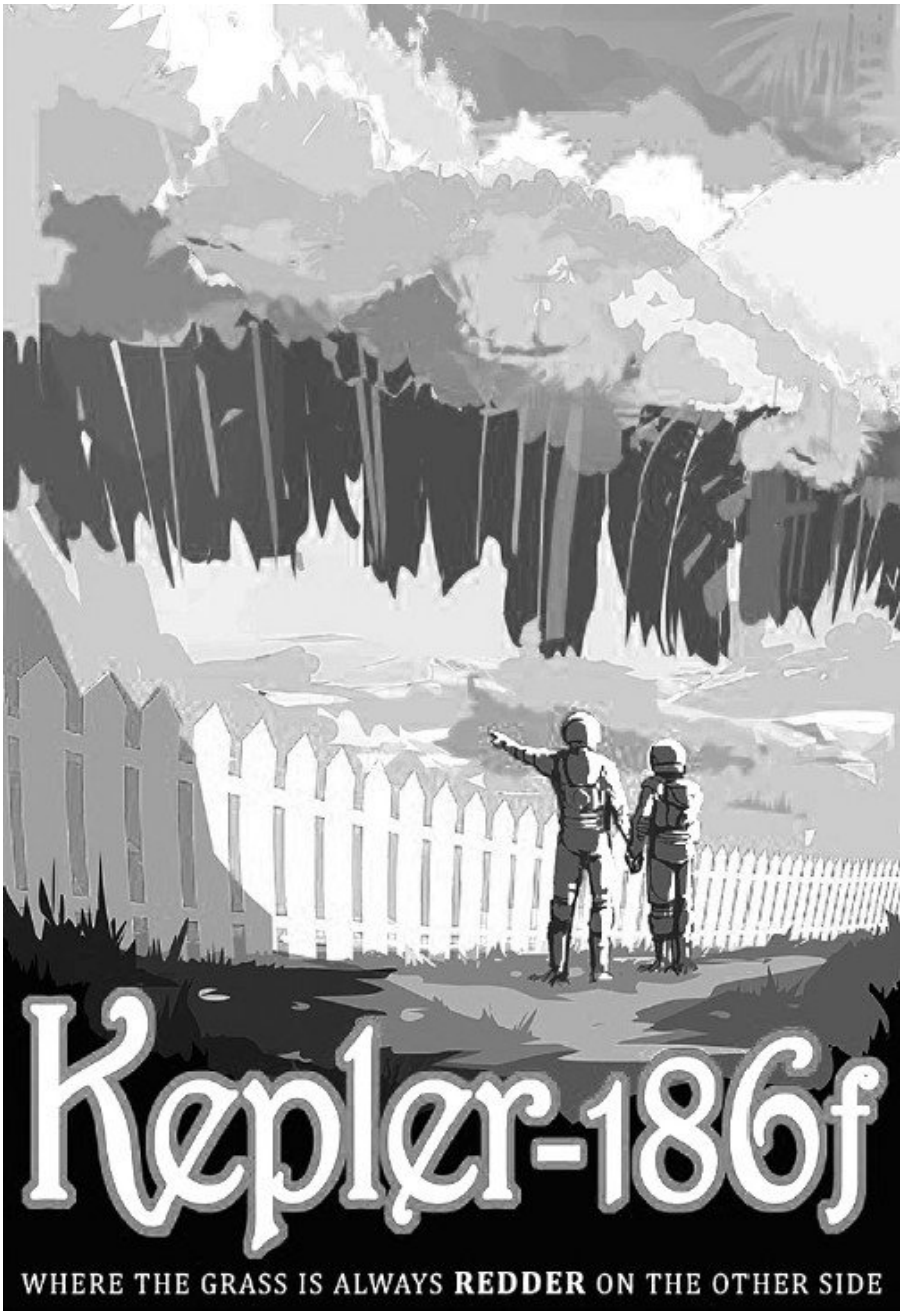
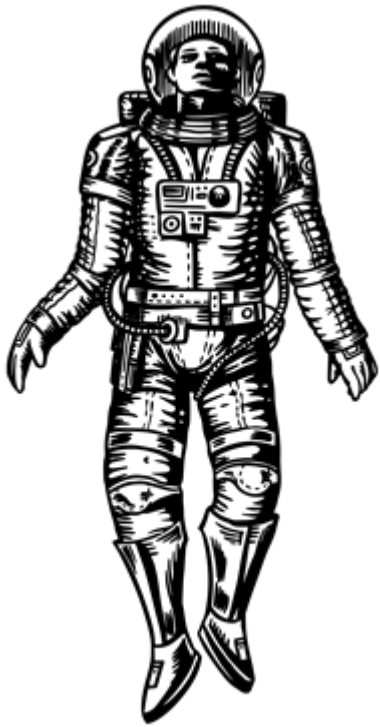


Рисунок 26. Плакат *NASA* с приглашением на *Kepler*-186 *f*

Ваш звездолет садится в прибрежной полосе какого-то острова, в небе оранжевая звезда, навечно застывшая возле горизонта. Под ногами хлюпает черное болото из незнакомой жизни, расцветшей в теплых прибрежных водах. Эксперименты эволюции с химией и благоприятнейшие условия привели к тому,

что на планете возникло несколько принципиально разных типов жизни. После такого жизнь на Земле кажется невероятно скучной. Эти существа знают о фотосинтезе, но кто-то из них стал полностью черным, чтобы не потерять ни фотона тусклого света, а кто-то предпочел красный цвет, улавливая излучение звезды в диапазоне его максимальной мощности. Пока ученые не нашли многоклеточных существ, но кто знает, что таит в себе толща океана.

Немного поодаль разгружают ящики с находками члены экспедиции, вернувшиеся с ночной стороны планеты. Что они там увидели, что нашли?..



Глава 15. Жизнь и история Земли

Раньше мы считали, что наша судьба написана на звездах. Сегодня мы знаем, что наша судьба в большей степени написана в наших генах.

ДЖЕЙМС УОТСОН

На страницах этой книги то и дело появлялись фантастические формы жизни: трисоляриане с пугающими жизненными циклами, жители подводных океанов спутников Юпитера и Сатурна с космологиями, чем-то напоминающими

науку средневековой Европы, зеленая слизь суперземель. Конечно, все это – лишь игра ума, Вселенная устрашающе молчалива. Если где-то в Галактике и есть жизнь, пока она не дает о себе знать. Все, чем мы располагаем, это лишь одна форма жизни – земная. Насколько распространена жизнь в нашей Галактике? Похожа ли внеземная жизнь на то, что мы видим вокруг себя, или она принципиально иная? Сможем ли мы когда-нибудь поговорить с инопланетянами? Ответов на эти вопросы до сих пор нет, мы можем только строить гипотезы или сочинять фантастические рассказы. Но ведь с чего-то нужно начинать поиски. Самый логичный первый шаг – попытаться понять, почему жизнь возникла именно на Земле. Другими словами, определить, какие из условий, сложившихся на Земле, оказались необходимыми для того, чтобы здесь зародилась и развилась жизнь. Когда мы это поймем, мы сможем найти во Вселенной места, лучше всего приспособленные для жизни, и, быть может, встретим там инопланетян. Разве эти условия так уж уникальны? Ведь Земля кажется ничем не примечательной планетой у рядовой звезды в случайном месте Галактики.

Для начала нам стоит договориться о том, что мы считаем жизнью. Ведь действительно, если мы попадем на другую планету, как мы узнаем, что эта зловонная дергающаяся субстанция и есть первая внеземная жизнь, обнаруженная людьми? Было бы здорово иметь ясное определение, с которым согласились бы все. Да, было бы здорово, но его нет. Вселенная – слишком интересное место, чтобы разбрасываться простыми ответами. Хотя мне лично нравится другая мысль, высказанная, к сожалению, неизвестным мне человеком: «Природа проста. Вся сложность от нашего непонимания».

В древности верили, что что-то является живым благодаря наличию у этого чего-то некой нематериальной субстанции – души. С XVII века под эти представления неоднократно пытались подвести научную основу. Однако корень непонимания явления жизни состоит в том, что жизнь нельзя измерить – приписать ей какую-то числовую характеристику. Жизнь – это процесс, протекающий в материальных объектах. Она подобна огню. И как бы ни было сложно дать определение огню, дать определение жизни еще сложнее.

Какими свойствами, как мы ожидаем, должно обладать нечто, чтобы мы посчитали это нечто живым? Во-первых, живой организм отделен от внешней среды. Наименьшей структурной единицей организма является клетка – изолированный кусочек пространства, окруженный мембраной и заполненный содержимым клетки – цитоплазмой. Мембрана делит весь мир

клетки на две неравные части, на свое и чужое. Это главное предназначение мембраны. То, что является своим, работает на благо всей клетки, «тащит» все ее содержимое из прошлого в будущее, не позволяет распасться. С чужим надо как-то взаимодействовать: получать от него энергию или защищаться. Каких бы примитивных существ мы ни рассматривали, мы неизменно обнаруживаем клеточную структуру.

Во-вторых, живой организм преобразовывает один вид энергии в другой. Клетки вашего организма поглощают кислород, который вступает в окислительную реакцию с глюкозой в митохондриях ваших клеток, и в результате образуется кислота АТФ – основной источник энергии для всех внутриклеточных биохимических процессов.

Третье свойство любых живых организмов состоит в том, что они способны воспроизводить свои копии или потомков, похожих на себя. Было бы ошибочным считать, что воспроизводство себе подобных – цель любого живого организма. Просто так сложилось, что те, кто делали это, дожили до наших дней, а остальные нет.

Чтобы выживать в постоянно меняющейся среде, у живых организмов должен быть механизм, позволяющий их потомкам приспосабливаться к окружающим условиями. Эту задачу природа решила, придумав половое и бесполое размножение. При бесполом размножении клетка делится на две части – точные копии исходной клетки. Иногда, в результате какого-то сбоя, эти новые клетки могут отличаться от исходной клетки. При половом размножении потомки наследуют случайные признаки обоих родителей, что создает уникальных организм. Если определенный признак дает живому организму преимущество, у него больше шансов оставить потомство, нежели у тех, у кого этого признака нет. Изменчивость организмов – краеугольный камень естественного отбора, пресловутого закона, согласно которому выживает наиболее приспособленный. Подверженность отбору и есть четвертое и последнее свойство живого организма.

Первое и второе из выделенных свойств имеют непосредственное отношение к метаболизму, процессу индивидуального существования живого организма, а третье и четвертое свойства – к истории коллективов организмов.

Если однажды исследователи найдут нечто инопланетное, обладающее метаболизмом, использующее внешние источники энергии и вещества для борьбы с беспорядком, контролирующее и управляющее потоками энергии и веществ внутри себя на благо самого себя и при этом проявляющее способность к эволюции, адаптации к внешним условиям, то бесспорно, мы вправе будем

назвать это инопланетное нечто живым организмом.

В качестве отступления замечу, что, перечислив свойства живого организма, я неявно предположил наличие на обитаемой планете трех обязательных компонентов: источника энергии для метаболизма, жидкого растворителя, чтобы поддерживать химию метаболизма, и набора питательных веществ, необходимых для наращивания биомассы[110]. Источником энергии могут быть звезды или геотермальные источники; растворителем, скорее всего, является вода (с одной стороны, в силу распространенности во Вселенной, а с другой – благодаря уникальным свойствам, которые мы обсудим чуть позже); питательные вещества и минералы могут поступать из недр планеты, с метеоритами или производиться другими организмами на более низкой ступени пищевой цепочки. Эти неявные предположения полезно держать в уме, рассуждая о разных экзотических формах жизни.

Наследственность и изменчивость, те свойства, в силу которых организмы Земли подвержены эволюции, реализуются благодаря одной макромолекуле – дезоксирибонуклеиновой кислоте (ДНК)[74]. ДНК представляет собой длинную спираль, состоящую из четырех типов специальных молекул – нуклеотидов: аденина, гуанина, тимина и цитозина. Каждый наследственный признак организма кодируется определенными участками ДНК, которые называют генами. Все разнообразие жизни на Земле и все индивидуальные отличительные признаки обязаны бесчисленным вариациям генов – взаимному расположению нуклеотидов.

Спонтанное изменение, или мутация, генов при размножении обеспечили жизни поразительную приспосабливаемость. Ученые находят живые организмы практически везде, даже в местах с самыми экстремальными условиями: в самой глубокой точке земного шара – на дне Марианской впадины, в самой засушливой пустыне мира – пустыне Атакама, во льдах Антарктики и возле жерл вулканов. Кажется, на Земле не осталось ни одного места, где бы отсутствовала жизнь.

Генетическая информация, закодированная в ДНК, реализуется посредством белков, состоящих, в свою очередь, из аминокислот. Из всех возможных аминокислот, а их насчитывается около 400, в составе белков присутствуют только 20. Почему-то природа из всего разнообразия аминокислот выбрала лишь эти. Отматывая пленку жизни назад, мы видим перед собой все более и более простые организмы, пока в конечном счете не приходим к первой клетке. Именно от нее произошла вся жизнь на Земле. Эту первую клетку ученые

называют «последний универсальный общий предок»[75].

Почему ученые уверены, что вся жизнь на Земле произошла от одной клетки, а не от двух, например, появившихся независимо в разных точках планеты? Эта уверенность основана на поразительном наблюдении. Несмотря на кажущиеся различия в формах, которые может принимать жизнь, от плесени до осьминогов, на молекулярном уровне все биологические организмы демонстрируют поразительное биохимическое единство: помимо общего набора аминокислот и использования ДНК в качестве наследственного материала, все они кодируют информацию сходным образом и у каждого из них проявляются вариации одних и тех же энергетических механизмов[111].

ДНК и белки по большому счету представляют собой длинные углеродные цепочки с включением некоторых других элементов. Углерод не случайно оказался каркасом всей живой материи на Земле. Главной его отличительной чертой является способность образовывать множественные и прочные химические связи. Он это делает эффективнее, чем любой другой элемент во Вселенной (с оговоркой на то, что мы рассматриваем температуры, лежащие недалеко от температур кипения жидкости). Соединения на основе углерода могут быть окислителями, восстановителями, кислотами и основаниями. Кроме того, углерод превосходно образует связи с другими

химическими элементами, облегчая метаболизм живых организмов.

Конечно, нельзя отрицать, что где-нибудь во Вселенной есть неуглеродные формы жизни. Самые напряженные дискуссии ведутся относительно возможности существования кремниевой жизни. У кремния и углерода много схожих химических свойств. Как и углерод, кремний способен образовывать длинные молекулярные цепочки и переносить генетическую информацию. Кремниевая жизнь, предположительно, могла бы существовать в условиях, где невозможна жизнь углеродная, например на планетах с экстремально высокими температурами или в среде, богатой серной кислотой. Но все же кремний проигрывает углероду в химической универсальности, в способности образовывать стабильные соединения. Быть может, когда-нибудь кремневая жизнь и станет предметом исследований астробиологов, но пока большинство из них сошлись на том, что если во Вселенной и есть жизнь, то она, скорее всего, углеродная.

Другое важное вещество – вода, которая благодаря своим уникальным химическим свойствам стала основой всей известной нам жизни[112]. Во-первых, вся сложная химия жизни нуждается в растворителе, чтобы осуществлять транспорт питательных веществ из внешней среды в клетку и внутри клетки. Молекула воды, как известно, состоит из атома кислорода и двух атомов водорода, образующих прочные (ковалентные) связи. Кислород перетягивает на себя общую с водородом пару электронов, приобретая отрицательный заряд, а водород становится заряженным положительно. Молекулы с такой зарядовой асимметрией называются полярными. Так удачно сложилось, что и большинство органических молекул из-за своей сложности и несимметричности являются полярными. Молекулы воды образуют связи с положительно и отрицательно заряженными частями таких молекул и эффективно разбивают их на части. Именно это свойство и позволило воде стать универсальным растворителем для жизни.

Во-вторых, вода участвует в образовании клеточных мембран, протекании многих важнейших реакций внутри клетки. Именно поэтому везде, где мы ищем жизнь, мы ищем условия, при которых вода может находиться в жидкой форме.

Что касается происхождения воды на Земле, есть вопросы, на которые пока не удается получить однозначные ответы. Существуют две основные гипотезы о происхождении поверхностных вод на Земле: эндогенная и экзогенная[113]. Согласно первой, Земля во время своего формирования захватила основную массу воды из протопланетной туманности. Оказавшись

«запертой» внутри планеты, впоследствии вода вырвалась из ее недр в процессе извержения вулканов. Вторая, экзогенная, гипотеза гласит, что вода имеет космическое происхождение и была доставлена на Землю метеоритами и кометами, бомбардировавшими планету на протяжении миллиардов лет.

Какая гипотеза верна, можно выяснить, точно измерив количество воды на Земле. Однако до сих пор неизвестно, содержат ли глубокие слои нашей планеты воду или же ее присутствие ограничено только верхними слоями. Если верна эндогенная гипотеза, недра Земли должны быть богаты водой. На наличие залежей льда глубоко под землей указывают обнаруженные включения особой модификации льда (лед-VII) в алмазах, образование которых происходит в земной мантии на глубине в несколько сотен километров при высоких температуре и давлении[114]. Дальнейшие открытия показали, что наша планета содержит водород на глубине как минимум до 1 000 км. А это доказывает, что воды на Земле гораздо больше, чем ожидалось до сих пор, – но насколько? Если окажется, что вода присутствовала в глубинах Земли постоянно, а не была перенесена в мантию с поверхности, это станет весомым аргументом в пользу эндогенной гипотезы.

Но все же большинство ученых склоняется к экзогенной гипотезе. Подтвердить или опровергнуть ее могут изотопные исследования. Один или даже два атома водорода в молекуле воды могут быть замещены дейтерием (обозначается *D*) – «тяжелым» водородом[76]. Содержание дейтерия в воде варьируется даже в Солнечной системе. Например, у планет-гигантов оно примерно в шесть раз ниже, чем на Земле. Теоретически, имея известное отношение *D/H*, свойственное земным океанам, можно найти в космосе тела с таким же отношением *D/H* – они-то и будут ответственны за «транспорт» воды на Землю.

Долгое время считалось, что наличие воды на Земле связано с кометами, но многочисленные исследования заставили усомниться в этом предположении. Кометы Хейла – Боппа и Галлея имеют значения отношения *D/H* в два раза большие, чем морская вода Земли, комета 67*P*/Чурюмова – Герасименко – в три раза бóльшее. У еще одной кометы, 103*P*/Хартли, отношение *D/H* согласуется с отношением *D/H* в морской воде Земли, но изотопный состав азота не совпадает с земным. Такие различия в изотопных отношениях сильно пошатнули позиции «кометной теории» происхождения воды.

Сейчас многие ученые считают, что основную часть воды на Землю принесли метеориты, которые бомбардировали

поверхность нашей планеты в самом начале ее эволюции и во времена поздней тяжелой бомбардировки. Анализ изотопного состава метеоритов из Главного пояса астероидов показал схожие с земными значения отношения *D/H*. Также, согласно моделям, почти равное земному отношение *D/H* имеют кометы, чьи орбиты лежат в области пояса астероидов[77].

* * *

Итак, давайте вернемся к тому, с чего мы начали: в каких условиях на Земле зарождалась жизнь?

На сегодняшний день мы достаточно неплохо представляем, как проходил процесс эволюции Земли и ее биосферы. Один из самых интересных выводов, которые можно сделать, состоит в том, что не только температура Солнца, метеориты, скорость остывания Земли и подобные геофизические условия оказывали воздействие на биосферу, но и органический мир преобразовывал планету, влиял на ее геологическую историю. Более того, именно из-за этого влияния у нас есть шанс найти обитаемые миры с помощью телескопов.

Геологи делят историю нашей планеты на четыре больших эона – отрезка геологической истории: катархей (или гаден), самый древний, архей, протерозой и, наконец, фанерозой, в котором мы с вами и живем. Чем дальше в прошлое мы хотим заглянуть, тем меньшим количеством материала, сохранившего свидетельства эпохи, мы располагаем, тем более схематичными оказываются описания вех нашей истории. С самым первым эоном, длившимся первые 500 миллионов лет истории Земли, ситуация самая сложная. По-видимому, никаких горных образований, оставшихся с тех времен, не сохранилось вообще – все разрушилось в горниле катастрофических событий, сопровождавших формирование нашей планеты.

Непрерывные соударения Земли с метеоритами и процессы, сопровождавшие выделение ядра из магмы, почти полностью расплавили ее поверхность. Возникли настоящие океаны из лавы, просуществовавшие около 100 первых миллионов лет. Следы этих океанов в виде переплавленных пород мы находим как на Земле[115], так и на Луне[116].

Затем все еще горячая и покрытая сетью разломов и вулканов молодая планета подверглась новому испытанию. Большинство ученых сходится на том, что около 4,1 миллиарда лет назад началась поздняя тяжелая бомбардировка[117]: на Земле ее следы были уничтожены эрозией, но на Луне они есть (на ее

возвышенностях, по возрасту соответствующих земному катархею, плотность метеоритных кратеров гораздо больше, чем на более молодых). Каждый метеоритный удар поднимал температуру поверхности Земли на сотни градусов, испарял уже образовавшиеся водоемы и уничтожал любую успевшую закрепиться на планете жизнь. Это привычная точка зрения на раннюю историю Земли, сформированная в XX веке. Однако открытия, сделанные уже в новом столетии, заставляют ее пересмотреть. Я хочу рассказать всего о трех открытиях, которые способны перевернуть все наши представления о времени возникновения древней жизни.

Для начала перенесемся в Австралию. Сегодня ученым не известны никакие горные породы достоверно старше 4 миллиардов лет. Сохранились лишь крупицы катархейских минералов (размером намного меньше 1 мм), которые не были уничтожены. Есть несколько мест, где такие минералы можно найти. Один из них – горный хребет Джек Хиллс в Австралии. В его осадочных породах в 2001 году группа профессора Джона Вэлли обнаружила древнейшие катархейские кристаллы циркона, невероятно прочные и долговечные, возрастом 4,374 миллиарда лет. Их возраст совсем немного уступает возрасту самых старых из известных метеоритов (4,565 миллиарда лет)[118], по которым определяется возраст всей Солнечной системы и Земли в частности. Когда образовались эти кристаллы циркона, Земле было всего 160 миллионов лет! Однако ценность этих кристаллов заключается даже не столько в их возрасте, сколько в той информации о ранней Земле, которую удалось получить благодаря им.

Изотопный анализ кристаллов циркона из Джек Хиллс показал, что климатические условия на Земле 4,4 миллиарда лет назад были сходными с условиями в период 3,8–2,6 миллиарда лет назад[119], то есть с условиями той эпохи, когда на Земле уже плескались океаны жидкой воды, полные микроорганизмов. Это означает, что 4,4 миллиарда лет назад у Земли уже была твердая и относительно холодная кора, на которой могли находиться водоемы с жидкой водой.

Чтобы увидеть второе свидетельство древней жизни, необходимо отправиться в Канаду, но для начала заглянуть на дно Тихого океана, в район Галапагосских островов, где в 1970-х годах впервые были обнаружены «черные курильщики». Потом их будет открыто множество: вдоль краев тектонических плит, подводных гор и срединно-океанических хребтов. «Черными курильщиками» называют источники нагретой магмой до 350–400 ˚С воды, поднимающиеся из трещин земной коры, черные из-

за сульфидов металлов. В отсутствии любого другого источника энергии «черные курильщики» становятся просто оазисами для жизни. Глубоководные, невосприимчивые к таким высоким температурам бактерии преобразуют растворенные в воде минералы, поступающие из недр, в пищу и, размножаясь, привлекают мелких животных, которые ими питаются, а те, в свою очередь, становятся пищей для более крупных глубоководных существ. На заре времен «черные курильщики» тоже дымили на дне океанов.

Из обнаруженных на сегодня неразрушенных скал наиболее древними считаются породы в поясе Нуввуагиттук в Канаде возрастом около 4 миллиардов лет[120]. Здесь были найдены трубкообразные отложения и нити, по структуре и минеральному составу сильно напоминающие те, что образуют микроорганизмы, живущие возле выходов геотермальных вод на дне океанов сегодня[21]. Если найдутся неоспоримые доказательства того, что эти структуры пояса Нуввуагиттук действительно были образованы древними микроорганизмами, то они станут древнейшими свидетельствами наличия жизни на Земле. Более того, эти структуры укажут, где эта жизнь возникла и где она может возникнуть на других планетах.

Кстати, в 2015 году было выполнено изотопное исследование графитовых включений возрастом 4,1 миллиарда лет в более молодых кристаллах циркона из Джек Хиллс. Оказалось, что с большой долей вероятности они имеют биогенное происхождение[122], что также указывает на наличие биосферы уже в те далекие времена.

За третьим неоспоримым свидетельством древней жизни вернемся в Австралию, но теперь на запад континента, где на окаменевшем дне мелководных бассейнов в формации Стрелли-Пул были найдены маленькие, около 10 мкм в диаметре, полые органические сферы. Возраст формации, где обнаружены находки, составляет около 3,4 миллиарда лет. Эти сферы являются остатками крупных микроорганизмов, имевших защитную оболочку[123]. И хотя сложности эукариотических клеток они не достигли, столь любопытная биологическая структура, очевидно, не могла возникнуть спонтанно – ей предшествовал долгий эволюционный путь. Когда он начался, никто не знает.

Три описанных выше свидетельства древней жизни фиксируют временные рамки ее происхождения. Благодаря исследованиям кристаллов циркона стало известно, что океаны жидкой воды существовали на Земле как минимум с середины катархея. Видимо, во время поздней тяжелой бомбардировки падения крупных метеоритов, способных вскипятить океаны,

перемежались продолжительными периодами относительного спокойствия. Эти периоды позволили существовать океанам воды и дали возможность развиваться в них жизни.

Еще совсем недавно казалось удивительным, что возраст первых обнаруженных свидетельств древней жизни необъяснимым образом совпадает со временем конца поздней бомбардировки. Однако сейчас уже следует удивляться другому. Вероятно, жизнь на Земле возникла почти сразу же после того, как на ней образовалась твердая кора. Но до сих пор нам удавалось найти только косвенные доказательства присутствия жизни. С уверенностью можно сказать лишь, что где-то между 4,4 и 3,4 миллиарда лет назад появилась первая живая клетка.

Как же она образовалась? В начале главы я уже отмечал, что метаболизм и эволюция представляют собой основу жизни. В земных жизненных формах метаболические и генетические функции тесно переплетаются. Все теории, которые стремятся объяснить происхождение жизни, сталкиваются с дилеммой: что важнее и что первично – метаболизм или генетика?

Приверженцы первого подхода считают, что жизнь начинается с развития примитивного метаболизма. Они пытаются реконструировать окружающую среду, химические и физические процессы, связанные с происхождением жизни. Один из главных вопросов в рамках этого подхода заключается в том, что считать переходом от химической к биохимической эволюции.

Вплоть до 1920-х годов представления о происхождении жизни были в значительной степени спекулятивными. В 1924 году русский биохимик Александр Опарин предложил теоретическую модель химической эволюции. Согласно его модели в атмосфере ранней Земли неорганические молекулы самопроизвольно образовывали органические молекулы (простые сахара и аминокислоты), которые стали первыми кирпичиками жизни. Благодаря работам Опарина в научную парадигму прочно вошло понимание того, что жизнь на Земле возникла в результате физико-химических процессов, которые можно понять, смоделировать и проверить в ходе экспериментов. Несмотря на множество изменений и дополнений, сценарий Опарина остается частью модели, используемой сегодня.

Например, в 1952 году Гарольд Юри[78] и его аспирант Стэнли Миллер проводили эксперименты, в которых пытались воссоздать условия на ранней Земле[124]. Для этого они частично заполнили одну стеклянную сферу водой (представляющей океан), а вторую, соединенную с первой стеклянными трубками, – смесью газов, которые, по их мнению, составляли атмосферу древней Земли: метана, воды, водорода и аммиака. Вода в сфере

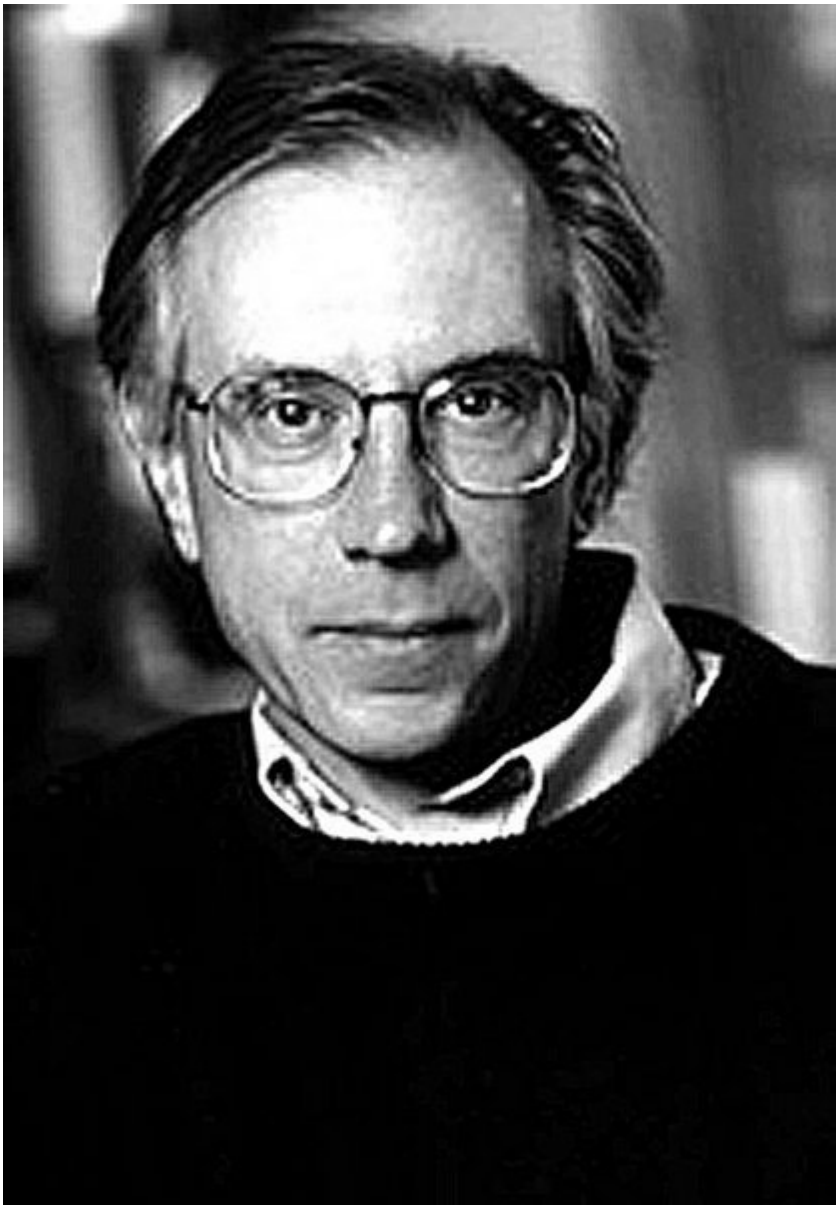
подогревалась для имитации воздействия Солнца, а в «атмосфере» периодически генерировались электрические заряды, моделировавшие молнии. Через несколько недель после начала эксперимента вода изменила цвет на буро-коричневый, а вскоре «океан» и вовсе покрылся черным смолянистым налетом. Последующий анализ показал наличие в сосуде бульона из самых разнообразных органических веществ и аминокислот – так идеи, высказанные Опариным, получили свое экспериментальное подтверждение.

Эксперимент Юри – Миллера в первую очередь продемонстрировал, как некоторые биологические молекулы, например простые аминокислоты, могли возникнуть в результате небиологических процессов. И хоть Юри и Миллер исходили из ошибочных представлений о составе земной атмосферы, их ошибка не повлияла на главный вывод: на древней Земле могли самопроизвольно возникать сложные органические вещества[125]. С тех пор было предложено множество различных химических небиологических реакций, в частности синтез большинства аминокислот, липидов и других простых биологических молекул, для объяснения происхождения органической материи в самых неблагоприятных условиях – даже в межзвездном пространстве, на астероидах и кометах[126].

Оппонентами сторонников гипотезы о первичном метаболизме выступают те ученые, которые считают, что жизнь началась с появления самокопирующихся молекул. Причина, по которой вообще стали говорить о том, что генетика первичнее метаболизма, заключается в желании преодолеть биохимическую проблему курицы и яйца. Для протекания многих химических реакций в биологических системах требуются белковые ферменты – вещества, присутствие которых ускоряет скорость реакций в миллионы, миллиарды и даже триллионы раз. Помимо ДНК, важным участником мистерии жизни является РНК. Это макромолекула, которая считывает инструкции, переносимые ДНК, и участвует в синтезе белков, в том числе белковых ферментов. Структура РНК хранится в молекуле ДНК. Долгое время разделение «обязанностей» между молекулой – хранителем информации и молекулой, считывающей эту информацию, считалось одним из основных принципов молекулярной биологии. Но в этом и лежит корень проблемы.

С одной стороны, нам нужны ферменты, чтобы создать ДНК, и РНК, а с другой – нам нужна ДНК, чтобы создать эти ферменты. Эту дилемму пытались решить множеством способов, но все попытки оказались безуспешными. Перелом наступил, когда в начале 1980-х годов Томас Чех и Сидней Альтман обнаружили,

что РНК может также выступать в роли фермента (за это они получили Нобелевскую премию 1989 года). Эта двойственная функция РНК, участвовать в синтезе белков и действовать как фермент, позволила найти элегантное решение – создать концепцию РНК-мира.



Томас Чех

Впервые идею РНК-мира озвучил американский ученый Александр Рич в 1962 году[127]. Он полагал, что в течение какого-

то времени именно РНК была молекулой, переносящей генетическую информацию, то есть являлась основой жизни. Когда Рич высказал эту гипотезу, никаких доказательств у него и его коллег не было. Бурное развитие концепции РНК-мира началось лишь после публикации работ Чеха и Альтмана. Теперь от ученых, занимавшихся проблемой происхождения жизни, требовалось понимание того, как из «первичного бульона» создать молекулу РНК, которая будет производить ферменты для протекания химических реакций в протоклетке и в то же время выполнять функцию переносчика информационного кода. Макромолекула РНК, хоть и имеет достаточно сложную структуру, проще ДНК. Остальные сложности внутреннего устройства клетки предлагалось оставить естественному отбору.

Тем не менее не все ученые согласны с этой концепцией, поскольку она предполагает возникновение сложности и порядка, не предлагая правдоподобный и эффективный способ управлять энергией в системе[128]. В общем, дискуссия на тему РНК-мира все еще далека от завершения[129].

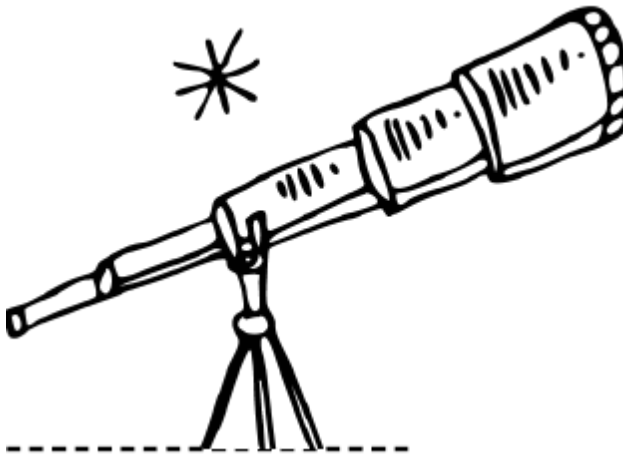
Сидней Альтман

Помимо вопроса о первичности метаболизма или генетики, существует и еще ряд подобных фундаментальных вопросов. Например, была ли первая жизнь самоподдерживающейся системой или использовала для функционирования химически сложную среду (как предполагал Опарин)? Даже появление границы клетки, мембраны, до сих пор вызывает споры. Было ли это ранним или поздним явлением в процессе развития жизни?

Внутренняя среда клетки химически и физически отличается от внешней, а следовательно, клеточная мембрана принимает активное участие в регуляции потоков вещества и энергии. Это

достаточно сложная структура, и трудно представить, как она могла эволюционировать в РНК-мире. С другой стороны, наличие мембран, ограничивающих распространение продуктов реакций, в которых участвуют катализаторы, – необходимое условие для разделения на свое и чужое, а значит, и возникновения естественного отбора[130]. Некоторые ученые полагают, что первые мембраны представляли собой неорганические структуры. Например, в местах, где продукты вулканической деятельности просачиваются на дно океана, железосерные минералы образуют трубчатые структуры и пористые отложения. Такие пузырьки и трубочки в геотермальных источниках могли быть первыми мембранами для первых клеток[131].

После своего возникновения жизнь сотни миллионов лет почти не давала о себе знать: ее влияние на геологические процессы на Земле было минимальным вплоть до следующего эона. 2,5 миллиарда лет назад начался протерозой – эон примитивной жизни, самый долгий эон в истории нашей планеты, продлившийся почти 2 миллиарда лет. В начале этого эона, примерно 2,3 миллиарда лет назад, океан, а потом и атмосфера стали интенсивно обогащаться кислородом, что привело к так называемой кислородной катастрофе[132]. Очень резко уровень кислорода в атмосфере вырос с 0 до почти 1 % от современного уровня. Причиной послужил фотосинтез: реакция, в ходе которой молекулы воды и углекислого газа, взаимодействуя с молекулой хлорофилла при участии фотонов света, преобразуются в глюкозу и молекулярный кислород. Считается, что аноксигенный фотосинтез (то есть тот, в результате которого не вырабатывается кислород) возник еще в архее. Появление молекулы хлорофилла сделало фотосинтез еще более эффективным, но в качестве побочного продукта реакции высвобождался кислород. Изменение атмосферы неминуемо сказалось на биоразнообразии: кислород – это смертельный яд даже для современных анаэробных организмов (для их жизнедеятельности им не требуется кислород), и он был им для древней бескислородной жизни. Возможно, в этот период произошло первое крупнейшее вымирание в истории нашей планеты. К сожалению, следы этой катастрофы до нас не дошли.



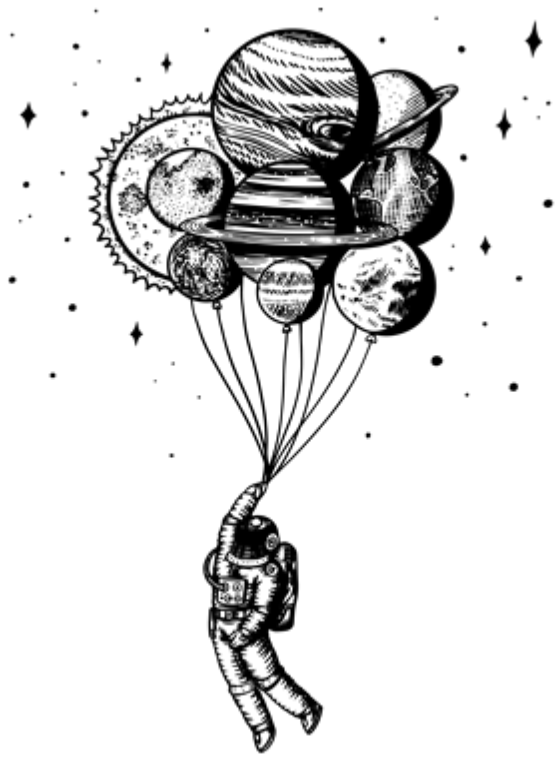
Гораздо более революционным событием и, пожалуй, самым радикальным эволюционным переходом со времен последнего общего предка стало появление эукариот. Эукариотические клетки принципиально отличаются от клеток бактерий и архей практически на всех уровнях организации. Во-первых, у бактерий нет ядра. Во-вторых, размер генома (то есть совокупности всех генов) у бактерий гораздо меньше, чем у эукариот (общее количество ДНК у эукариот в сотни тысяч раз больше, чем у бактерий[79]). К тому же ДНК эукариот устроено гораздо сложнее по сравнению с простыми, замкнутыми в кольца хромосомами бактерий.

Долгое время биологи были озадачены этими гигантскими различиями между бактериями и эукариотами. Казалось невозможным, что вторые произошли от первых. И действительно, прямого эволюционного пути между ними нет. Сегодня считается, что эукариоты возникли в результате слияния двух видов бактерий, изначально находившихся в тесном симбиозе: крупной анаэробной археи и более мелкой аэробной бактерии, ставшей предком митохондрий[80]. Возможно, для того чтобы это произошло, потребовались уникальные условия, которые больше не повторялись в истории Земли.

Дальнейший путь до многоклеточных организмов занял миллиарды лет. Сегодня мы живем в фанерозойском эоне – эоне явной жизни, который начался 542 миллиона лет назад. Но все, что мы привыкли называть жизнью, – лишь ее небольшая доля на планете. Основная биомасса жизни на Земле приходится на растения и бактерии (далее идут грибы и археи). Животные на их фоне практически не заметны и составляют лишь 0,3 % от всего биоразнообразия. Интересно, что животные в основном – это

членистоногие и рыбы, а масса людей почти в 10 раз больше, чем масса всех диких млекопитающих, вместе взятых, и на столько же меньше массы всех рыб[133].

Все наши знания об эволюции жизни говорят нам, что для ее возникновения не нужно каких-то специфических условий. Мы не видим никаких принципиальных различий между молодой Землей, уже способной поддерживать жизнь, и молодыми экзопланетами земного типа. Кажется, что как только на планете появляется твердая поверхность, а температура позволяет существовать жидкой воде, так тотчас и возникает жизнь. Если мы ничего не пропустили, Млечный Путь должен быть просто переполнен жизнью. Так почему же по нашему небу не летают корабли пришельцев и мы не принимаем от них радиосообщения? Неужели единственные обитатели экзопланет – это или микробы, или голые камни? В последней главе мы немного окунемся в астробиологию – науку, задачей которой является поиск и изучение инопланетной жизни, пока самую бесплодную, но, несомненно, весьма перспективную в XXI столетии.



Глава 16. Марсианские бактерии и поиски внеземной жизни

Экстраординарные заявления требуют экстраординарных доказательств.

КАРЛ САГАН

Конечно, мы ищем жизнь, похожую на знакомую нам земную. В прошлых главах я объяснял, почему мы ищем именно углеродные формы жизни и планеты, на которых в течение продолжительного времени могут находиться водоемы. Пока

наши поиски не увенчались успехом. Но по большому счету активных исследований экзопланет и не проводилось. Все, что мы пока можем узнать об экзопланетах, ограничивается самыми общими физическими характеристиками, поэтому в фокусе внимания астробиологов остаются планеты Солнечной системы и их спутники. По-прежнему остается шанс, что на этих телах нам удастся обнаружить живые организмы.

И все же, по всей видимости, если мы когда-нибудь и найдем жизнь на одной из планет, она будет состоять лишь из микроорганизмов. Давайте предположим, что первое экспериментальное путешествие на машине времени закончилось аварией: вы оказались в случайном моменте прошлого Земли. Что вы перед собой увидите? Скорее всего, ничего интересного (конечно же, если случайно не захватите микроскоп[81]). 90 % времени существования нашей планеты ее населяли исключительно одноклеточные микроорганизмы. Как бы скучно это ни звучало, но если мы когда-нибудь начнем пачками открывать экзопланеты с жизнью, то большая их часть будет представлять собой микробиологические лаборатории планетарного масштаба.

Нас поражает разнообразие планет Солнечной системы, но жизнь, похожая на нас с вами, могла зародиться лишь в четырех ее уголках: на Марсе, Европе, Энцеладе и Титане. Обо всех них мы уже говорили. Европу и Энцелад перспективными для обнаружения там внеземной жизни делает наличие огромных водоемов, богатых сложными углеводородами, и вероятная геотермальная активность. Титан тоже богат сложными углеводородами. Но удаленность всех этих космических тел, трудность их изучения и дороговизна миссий к ним заставляют руководителей космических агентств сдвигать даты исследовательских программ на неопределенное время. До сих пор главным претендентом на скорое открытие жизни за пределами Земли остается Марс. История надежд, разочарований, жарких споров, связанных с поисками марсианской жизни, может служить отличным примером того, с какими сложностями столкнутся будущие исследователи экзопланет. Давайте остановимся на свидетельствах марсианской жизни чуть подробнее.

Первую мягкую посадку на Красную планету совершил спускаемый аппарат советской космической станции «Марс-3» в 1971 году. Радиопередача с поверхности шла около 14,5 с, а затем прервалась по неизвестной причине. На этом миссия спускаемого аппарата закончилась. Оставшаяся на орбите станция из-за бушующей на планете в это время бури и неверных

настроек выдержки фотоаппарата передавала нечеткие фотографии поверхности Марса. Однако другие приборы, установленные на ее борту, смогли передать на Землю данные о характеристиках атмосферы и грунта и географических особенностях Марса.

В это время американцы исследовали внутренние планеты Солнечной системы с помощью космических аппаратов серии «Маринер», четыре из которых посетили Марс (с 1964 по 1971 год) и прислали-таки на Землю первые снимки его поверхности. Детальное исследование Марса началось с посадки на планету аппарата «Викинг-1» в 1976 году (вслед за ним на Марс приземлился второй аппарат программы – «Викинг-2»). На фотографиях, присланных «Викингом-1», перед исследователями предстал пустынный пейзаж с барханами песка и каменистыми возвышенностями. Ученые не увидели фантастического мира – картинка казалась разочаровывающе земной, воображение так и норовило достроить ее знакомыми образами. «Я бы, конечно, удивился, если бы из-за песчаного бархана появился седой геолог, ведущий на поводу мула, но в то же время сам пейзаж к этому располагал», – писал об этом Карл Саган»[82]. 40 лет спустя пыльный и грязный планетоход *Curiosity* пришлет множество снимков таких же достаточно однообразых марсианских пейзажей. Экзотикой стали лишь голубые закаты, которые не увидишь нигде на Земле.

Американская орбитальная станция «Маринер-9», посетившая Марс в 1971 году, «разглядела» на планете каналы (скорее напоминающие каньоны Аризоны или Кыргызстана, чем ирригационные сети Лоуэлла). Эти многочисленные разветвленные системы каналов и дельт[134], образованные потоками воды, стали одним из лучших доказательств наличия на Марсе рек и озер в прошлом. В избытке следы древней воды здесь в последующие годы нашла целая эскадра марсоходов, оснащенных, с каждой новой программой, все более совершенными наборами научных инструментов. Из геологических находок можно выделить различные осадочные породы и минералы, образование которых происходит только в воде (например, глину)[135]. Где же сейчас вся марсианская вода?

С октября 2001 года на орбите вокруг Марса находится станция «Марс Одиссей». С помощью его бортовых детекторов нейтронов удалось создать карту распределения водорода (и связанной с ним воды) в приповерхностном слое грунта. Идея исследования очень проста. Когда частицы космических лучей взаимодействуют с горными породами, образуются нейтроны, вылетающие из атомов под разными углами. Часть из них летит

обратно – их и регистрирует «Марс Одиссей». Но эти нейтроны обладают разной энергией: в зависимости от того, через какую породу им пришлось пройти на пути к станции. Подповерхностная вода служит хорошим замедлителем нейтронов, и то, насколько скорость нейтронов отличается от расчетной, позволяет вычислить количество воды в марсианском грунте. Оказалось, что водяной лед там занимает в среднем 14 % массы на глубине до 2 м (и это нижний предел оценки), а приполярные регионы могут содержать до 50 % водяного льда в верхнем метре грунта[136]. Открытых водоемов здесь нет, но, что удивительно, есть скрытые.

Совсем недавно радиолокационные исследования, выполненные орбитальным аппаратом «Марс-экспресс», обнаружили озеро жидкой воды шириной 20 км подо льдом на южном полюсе Марса[137]. Этот способ исследований возможен благодаря тому, что снег и лед прозрачны для высокочастотных радиоволн, а жидкая вода – нет[83]. Не удивляйтесь такому повороту событий. Жидкие озера в толще льда могут объясняться высоким давлением, создаваемым в полярных шапках, или же минеральными примесями в воде, снижающими температуру плавления водяного льда. Жидкая вода к тому же может образоваться из-за таяния подповерхностного льда. Так, в 2015 году пришло сообщение об обнаружении на марсианских склонах в летний период темных полос, которые могли образоваться при участии соленой воды[138].

Перечислять доказательства наличия воды на Марсе можно еще долго, но надеюсь, я вас уже убедил. Допустим, что здесь когда-то была микробная жизнь (в первый миллиард лет условия на Марсе и на Земле не сильно отличались). Далее предположим, что в то время как Марс терял атмосферу и замерзал, некоторые из этих микроорганизмов постепенно приспосабливались к новым условиям жизни на планете. Сегодня они могут жить в приповерхностных слоях марсианского грунта. Это действительно возможно – известно, что даже земные микробы способны выживать в марсианских условиях[139].

Располагают ли исследователи Марса хотя бы косвенными доказательствами существования там жизни? Ответ зависит от степени вашего оптимизма, так как четкого понимания нет ни у кого. Первым намеком на существование жизни в марсианской почве были эксперименты, проведенные еще «Викингами». В ходе одного из них в марсианский грунт вводилась капля разбавленного раствора из питательных органических веществ, молекулы которых содержали радиоактивный изотоп углерода $14C$ [140]. Идея была в том, что бактерии, если они есть в грунте,

усвоят часть веществ, а в качестве побочного продукта метаболизма выделят углекислый газ или метан, который можно обнаружить благодаря его радиоактивным свойствам. Именно это и произошло: «Викинги» зафиксировали радиоактивный углекислый газ, причем сделали это оба аппарата, а ведь их разделяло расстояние в 6 500 км! Последующее нагревание образцов грунта до 150 °C и повторное проведение эксперимента дало отрицательные результаты – никакой газ из грунта уже не выделялся. Это расценили как свидетельство термической смерти бактерий. Уже можно было разливать по бокалам шампанское, но проведенный вслед за экспериментами анализ грунта не выявил следов каких-либо органических веществ, а значит, исключалось и наличие микробов. Чей же метаболизм в таком случае обнаружили «Викинги»?

Об этом до сих пор не умолкают споры. Большинство ученых сходятся во мнении, что газ выделился в ходе ряда абиотических процессов, тогда как остальные настаивают, что никакие процессы небиологической природы не могут в полной мере объяснить полученные результаты (в числе главных сторонников существования жизни на Марсе руководитель злополучного эксперимента «Викингов» Гилберт Левин[141]).

Как вы помните, в истории Земли примерно 2,3 миллиарда лет назад произошло важное событие – речь идет о резком увеличении уровня кислорода в атмосфере планеты. Трудно представить себе процесс небиологической природы, который будет постоянно обогащать атмосферу кислородом. Будь у инопланетян приборы, позволяющие дистанционно исследовать планеты, рано или поздно они нашли бы Землю и догадались, что здесь есть жизнь.

Два с половиной миллиарда лет назад микроорганизмы радикальным образом изменили окружающую среду нашей планеты. Явления такого рода, доказывающие присутствие жизни, называются биосигнатурами, а вещества, структуры или объекты, используемые в качестве индикаторов ее присутствия, – биомаркерами[84]. Выделение углекислого газа в ходе метаболизма бактерий – это биосигнатура, а кислород – один из лучших биомаркеров. Другим хорошим биомаркером является метан, который в условиях Земли почти полностью производится живыми организмами.

Атмосфера Марса преимущественно состоит из углекислого газа (95 %), азота и аргона. Но на Красной планете есть еще и метан – газ, который на Земле имеет преимущественно биологическое происхождение! Впервые об открытии метана на Марсе заявили еще в 1969 году, на пресс-конференции, состоявшейся через два дня после того, как космический аппарат «Маринер-7» совершил облет Марса[142]. Инфракрасный спектрометр, установленный на аппарате, зарегистрировал характерные для метана линии поглощения вблизи полярных шапок. Однако впоследствии оказалось, что такие же линии поглощения характерны и для льда CO_2 – гораздо менее интересного вещества.

Первое до сих пор не опровергнутое сообщение об обнаружении метана было опубликовано в 1999 году командой, работавшей с телескопом «Канада – Франция – Гавайи»[85]. С тех пор почти каждый год то с наземных телескопов, то с орбитальных станций и марсоходов поступают сведения о регистрации метана. Количество метана в марсианской атмосфере ничтожно мало – десятки частей на миллиард[143]! И его природа нам до сих пор неизвестна. Присутствие метана не демонстрирует какой-либо зависимости от широты, но наблюдается зависимость от времени года[144]. Причем этот метан достаточно молодой: за 300 лет он исчез бы весь, окислившись в низких слоях атмосферы или вступив в реакцию с ультрафиолетовым излучением в высоких слоях.

Были предложены различные версии происхождения метана в ходе естественных процессов, но все они достаточно спорные. Плюс ко всему остается вероятность ошибки. Например, марсианская орбитальная станция *Trace Gas Orbiter*, работающая с 2016 года, пока никаких следов метана не обнаружила, хотя на ее борту есть два современных прибора, изучающих состав атмосферы Марса независимо друг от друга[145]. Все эти противоречивые сообщения оставляют много возможностей для спекуляций, и в итоге мы не можем исключить существование как абиогенных, так и биогенных источников марсианского метана. Может, никакого метана на Марсе и нет вовсе?

В июле 2020 года спектрометр на борту орбитального зонда, входящего в программу «ЭкзоМарс», обнаружил на Красной планете линии поглощения углекислого газа и озона. Эти линии поглощения были обнаружены именно в том диапазоне инфракрасного спектра, где астрофизики ищут сигналы от молекул метана, а потому ученые легко могли ошибиться и принять их за свидетельства наличия метана. Возможно, повторяется история 1969 года?

В ноябре 2019 года пришло еще одно странное сообщение: марсоход *Curiosity*, работающий в кратере Гейла, обнаружил сезонное колебание молекулярного кислорода[146]. Вообще говоря, в сезонных колебаниях относительных уровней газов нет ничего удивительного: зимой углекислый газ в больших количествах конденсируется на полярных шапках, что вызывает проседание его парциального давления. Так как CO_2 является основным компонентом атмосферы, изменение его уровня влечет за собой глобальный перенос атмосферных газов от полюса к полюсу[147]. Азот и аргон, которые не конденсируются при марсианских давлениях и температурах, перераспределяются за счет циркуляции газов в атмосфере: их концентрация увеличивается и уменьшается в соответствии с теоретическими моделями. Кислород же ведет себя удивительным образом. В течение весны и лета его количество увеличивается на треть по сравнению со средним уровнем (но, к сожалению, этого все равно недостаточно для дыхания), а осенью значительно уменьшается. Само собой, масс-спектрометр на *Curiosity*, измерявший уровень газов, был проверен несколько раз – он работал без ошибок. Такая значительная разница в летних и зимних уровнях кислорода не может быть связана с динамикой атмосферы и указывает на некий процесс в подповерхностных слоях Марса, в ходе которого производится кислород.

Последнее, о чем мне хотелось бы рассказать, чтобы закрыть тему Марса на страницах этой книги, – это метеорит *ALH* 84001, найденный в горах Алан Хиллс в Антарктиде в 1984 году. Стоит отметить, что Антарктида – прекрасное место для поиска метеоритов. В этой части света находят больше упавших с неба камней, чем где-либо еще. И дело не в том, что на нее падает больше метеоритов, а в том, что здесь их проще всего найти. Во-первых, черные пятна на снегу заметить гораздо легче, чем в какой-либо другой местности. Во-вторых, тут значительно медленнее идет эрозия, а потому сохранность метеоритов лучше. В-третьих, и это, пожалуй, самое главное, движение ледяных пластов к морю увлекает за собой древние метеориты, а затем выталкивает их из толщи льда на поверхность, когда ледник тает.

Марсианское происхождение *ALH* 84001 было установлено в ходе анализа как минерального состава метеорита, так и изотопного состава воздуха, пузырьки которого остались заключены внутри *ALH* 84001. Около 15 миллионов лет назад крупный метеорит упал на Марс и с такой силой взметнул камни вверх, что некоторые из них достигли космоса[148]. Один из таких обломков, *ALH* 84001, упал на Землю около 13 000 лет назад. Радиометрический анализ показал, что этот метеорит состоит из

пород возрастом 4 миллиарда лет, то есть относящихся к той эпохе, когда поверхность Марса была теплой и влажной, во многом напоминающей древнюю архейскую Землю. Вы уже в предвкушении открытий? И правда, в 1996 году был опубликован доклад научной группы под руководством Дэвида Маккея. В нем сообщалось об обнаружении полициклических ароматических углеводородов, карбонатных глобул и кристаллов магнетита – веществ, которые могут быть связаны с жизнедеятельностью и продуктами распада микроорганизмов. Более того, отмечалось, что в метеорите найдены окаменелости микрофоссилий (колоний бактерий)[149]. Находка оказалась поистине сенсационной!

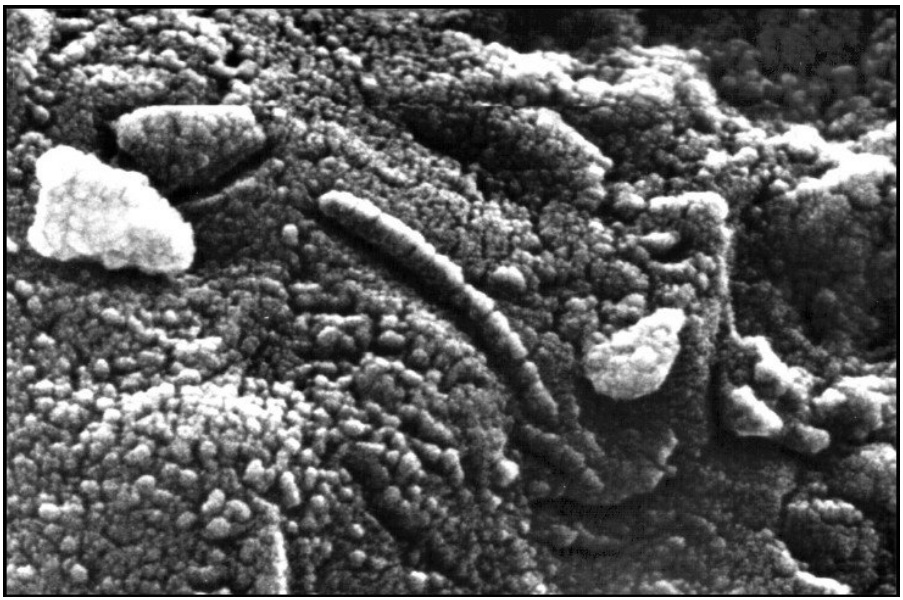


Рисунок 27. Структуры, напоминающие бактерий, в метеорите *ALH* 84001

На одной пресс-конференции Билл Клинтон, в ту пору президент США, высказался об этом открытии: «Сегодня камень 84001 говорит с нами сквозь все эти миллиарды лет и миллионы миль. Он говорит о возможности жизни. Если это открытие подтвердится, оно, несомненно, станет одним из самых потрясающих открытий в нашей Вселенной из когда-либо сделанных наукой. Его последствия настолько масштабные и воодушевляющие, насколько только можно себе представить. И хотя оно обещает ответить на некоторые из наших давних вопросов, оно ставит и новые, еще более фундаментальные».

В научном сообществе разгорелась жаркая дискуссия: являются ли свидетельства древней жизни, обнаруженные в

метеорите *ALH* 84001, достаточно убедительными? Если коротко, то нет. Хотя структуры и вещества, приводимые в качестве доказательств, и сопровождают некоторые биологические процессы, все они по отдельности могут иметь небиологическую природу[150].

В 2000 году в Антарктиде нашли еще один марсианский метеорит – *Yamato* 000593. В нем также обнаружили структуры, имеющие отношение к биологической жизни, но опять же, каждую из них можно объяснить и геологическими процессами в древних марсианских горячих источниках[151]. Все это говорит лишь об одном: если вы хотите сделать громкое заявление, вы должны иметь на руках железные доказательства.

Марс на протяжении последних 500 лет был причиной многих научных споров: от обоснования гелиоцентрической картины Коперником до каналов Скиапарелли – Лоуэлла, а затем – таинственных метеоритов и следов метана в атмосфере. Он хитрил, интриговал, возбуждал воображение астрономов. Находящаяся на пике история поиска жизни на Марсе – ее свидетелями являемся и мы сегодня – показывает, как трудно добыть доказательства существования внеземной жизни, которые убедили бы всех.

Автоматические лаборатории на марсоходах и упавшие на Землю марсианские метеориты позволяют увидеть только часть головоломки. Для того чтобы окончательно ответить на вопросы о существовании жизни на Красной планете, необходимо доставить марсианский грунт на Землю и уже здесь самым тщательным образом его исследовать. Такие планы уже есть. Ожидается, что новый марсоход *Perseverance*, который уже летит к Марсу, поместит добытые им образцы марсианской породы в герметичные пробирки и оставит их на поверхности. Примерно в 2026 году, согласно предварительным договоренностям, должна стартовать объединенная миссия ЕКА и *NASA*, которая доставит эти образцы на Землю, – что и вовсе произойдет не раньше 2032 года.

* * *

Стартовав с Земли в октябре 1989 года, аппарат «Галилео» направился прямиком к Венере, ускорился в ее гравитационном поле, затем два раза обернулся вокруг Земли и только потом полетел к Юпитеру. Эти гравитационные маневры помогли существенно сэкономить топливо, хоть и увеличили время в пути. В ходе первого облета Земли на расстоянии около двух

миллионов километров «Галилео» направил все свои приборы на нашу планету, чтобы посмотреть на нее как на инопланетный мир. Что мы смогли бы сказать об условиях на поверхности Земли? Распознали бы, что на этой планете есть жизнь? Эти эксперименты предложил и спланировал Карл Саган, задавшись вопросом, легко ли обнаружить жизнь на Земле из космоса. Основная идея состояла в том, что метаболизм живых существ меняет физико-химические характеристики планеты уникальным образом.

В 1993 году Саган и его коллеги опубликовали в *Nature* статью, посвященную этому вопросу[152]. Они писали, что «Галилео» обнаружил явные свидетельства обитаемости нашей планеты – мы бы сейчас назвали их биомаркерами. В их числе сильное поглощение света в красной области видимого спектра (за что ответственен хлорофилл в растениях), спектральные признаки присутствия молекулярного кислорода в атмосфере, инфракрасные спектральные линии, вызванные метаном в атмосфере, а также модулированные узкополосные радиопередачи определенно искусственного происхождения.

Облет нашей планеты «Галилео» был только первой частью запланированного эксперимента. Тогда как Земля полна жизнью, Луна, мы точно знаем, абсолютно безжизненна. Вторая часть эксперимента заключалась в том, чтобы исследовать Луну и попытаться найти на ней ложные свидетельства жизни. В 1992 году, совершая облет вокруг Луны, «Галилео» никаких доказательств жизни на Луне не обнаружил. Конечно, это вселяло надежду на то, что обитаемые планеты можно однозначно идентифицировать. Однако Вселенная опять оказалась не так проста.

Начать поиск экзопланет, пригодных для жизни, следует с составления каталога потенциально обитаемых экзопланет. К сожалению, мы не сможем учесть в этом каталоге спутники экзопланет. Когда пишутся эти строки, ни одной подтвержденной экзолуны еще не обнаружено.

Первоначальная оценка того, принадлежит ли планета к числу потенциально обитаемых, может быть сделана на основе значений ее массы и радиуса, типа родительской звезды и расстояния до нее. Если мы нашли каменистую планету, расположенную в зоне обитаемости, двигаемся дальше. Следующий шаг – определение состава атмосферы экзопланеты, чтобы понять, способна ли она поддерживать на своей поверхности воду в жидкой форме. На сегодняшнем этапе развития измерительной техники мы только-только подобрались к изучению экзопланетных атмосфер. Но если в будущем мы

узнаем, что та или иная экзопланета способна поддерживать устойчивые резервуары с жидкой водой, это тоже не будет железным доказательством существования там жизни.

Надежным свидетельством наличия жизни, хотя и не стопроцентным, могут стать биомаркеры в атмосферах экзопланет и на их поверхностях. Безусловно, чем обильнее и многообразнее жизнь, тем сильнее ее влияние на планету, так что о чем более немногочисленной жизни идет речь, тем сложнее распознать ее следы из космоса. Но и отсутствие биомаркеров – не доказательство отсутствия жизни[153].

В астробиологических исследованиях наиболее часто упоминается молекулярный кислород и его фотохимический продукт озон как один из лучших биомаркеров. Кислород – второй по массе газ в современной атмосфере Земли, он должен быть хорошо заметен в спектре планеты и, самое главное, практически весь производится фотосинтезирующими организмами. Но этот, казалось бы, идеальный биомаркер присутствует в атмосфере Земли в каких-либо заметных количествах лишь малую часть времени ее существования. После «кислородной катастрофы» на протяжении около 2 миллиардов лет он оставался на относительно низком уровне (даже меньше 1 % массы[154]), что делало его не самым легко обнаружимым газом в атмосфере. Также он может образовываться в результате некоторых не связанных с биологическими агентами реакций, например при разрушении ультрафиолетовым излучением молекул воды или углекислого газа. На Земле это происходит с очень низкой скоростью, поэтому богатая кислородом атмосфера не создается. Но на других планетах, если поверхностные условия на них и характеристики звезды способствуют фотолизу[86] углекислого газа, богатая кислородом атмосфера может появиться и без участия каких-либо живых организмов[155].

Другой газ, присутствие которого часто рассматривается как биомаркер, – метан. Еще Карл Саган отмечал, что метан, в силу практически полного органического происхождения в условиях Земли, служит одним из свидетельств обитаемости нашей планеты. На Земле от 90 до 95 % метана имеет биологическое происхождение[156], а оставшееся количество образуется в ходе различных геологических процессов (например, в срединно-океанических хребтах в результате химических реакций минералов с водой[157]). На том же Титане, на котором вряд ли удастся найти жизнь, похожую на земную, присутствуют абиогенные источники метана, которые не позволяют этому газу исчезнуть из атмосферы вот уже миллиарды лет.

Существуют и другие биомаркеры в атмосфере, например

C_2H_6, N_2O, CH_3Cl, CH_3SH, но основную идею вы, надеюсь, поняли: наличие ни одного из них по отдельности не является надежным критерием присутствия на планете жизни. Но стоит очень внимательно присмотреться к планете, в атмосфере которой обнаружится два или более биомаркера одновременно. Особенно интересны сочетания молекулярный кислород – метан и углекислый газ – метан. Одновременное присутствие таких пар означает, что атмосфера планеты обладает сильными окислительными свойствами, а значит, не способствует образованию метана как наиболее стабильной формы углерода (например, на Титане очень мало углекислого газа). В этом случае метан должен постоянно поступать в атмосферу благодаря биологическим агентам или же за счет абиотических реакций в водной среде планеты.

На настоящий момент обнаружено всего несколько экзопланетных атмосфер. Чем больше планета и чем ярче ее родительская звезда, тем легче обнаружить и исследовать атмосферу. Поэтому все планеты, наличие атмосферы у которых не вызывает сомнений, принадлежат к классам от горячих юпитеров до мини-Нептунов.

Сегодня легче всего исследовать планеты у красных карликов. Возможно, в одной такой системе мы скоро найдем признаки жизни. Наверное, самым знаменитым открытием последних лет стала система планет у звезды *Trappist*-1 в 39 св. годах от Солнца. *Trappist*-1 – это красный карлик с массой, равной всего 0,08 $M_\oplus$, и радиусом, совсем ненамного превосходящим радиус Юпитера. Вокруг этой звезды обнаружено еще как минимум семь скалистых планет с массами, близкими к массе Земли, но располагающихся на орбитах намного меньших, чем радиус орбиты Меркурия.

Первоначальные исследования системы были выполнены с помощью наземного телескопа *Trappist* в 2016 году[158]. Более поздние и тщательные – через год с помощью космического телескопа «Спитцер»[159]. Планетная система *Trappist*-1 оказалась очень необычной. Несмотря на низкую температуру звезды, всего 2 500 К, все планеты имеют близкие равновесные температуры, допускающие существование воды на их поверхностях. Шесть ближайших к звезде планет находятся во взаимных орбитальных резонансах друг с другом. Это может служить признаком миграции этих планет ближе к звезде в далеком прошлом.

В 2017 году было проведено моделирование атмосфер планет в широком диапазоне химических составов и давлений[160], которые показали, что только планеты *Trappist*-1 *d, Trappist*-1 *e*, и *Trappist*-1 *f* с наибольшей вероятностью имеют на поверхности

резервуары с жидкой водой, причем планета *Trappist*-1 *e* оказалась наиболее комфортной для возможной жизни из всех[161]. Когда телескоп «Джеймс Уэбб» наконец начнет проводить орбитальные исследования, одной из первых его задач, я уверен, будут исследования атмосфер планет *Trappist*-1.

Одно из самых нашумевших событий осени 2019 года связано с транзитной планетой *K*2-18 *b*[162]. Она вращается вокруг красного карлика в 124 св. годах от Земли. Большинство обнаруженных «Кеплером» красных карликов оказывались достаточно тусклыми звездочками, что сильно затрудняло исследование их атмосфер. К счастью, родительская звезда *K*2-18 *b* достаточно яркая, что позволило двум независимым командам ученых, комбинируя данные, полученные телескопами «Хаббл» и «Спитцер», обнаружить и исследовать газовую оболочку планеты. Неожиданно они получили данные, указывающие на наличие в атмосфере паров воды! Равновесная температура планеты равна –8 °C, а это значит, что теоретически на ее поверхности может существовать жидкая вода. Но есть и плохая новость: из-за своих размеров (2,6 $R_{\oplus}$) и массы (8,6 $M_{\oplus}$) эта планета отлично вписывается в класс мини-Нептунов[163], так что вторым домом для нас она не станет.

Мы стоим на пороге грандиозных открытий. Сегодня человечество как никогда близко подобралось к ответу на вопрос, одни ли мы во Вселенной. Ожидается, что в первой половине 2020-х годов начнут работать сразу несколько телескопов нового поколения. Возможно, уже совсем скоро на какой-нибудь планете мы обнаружим несомненные признаки жизни.

Небольшой космический транзитный телескоп *CHEOPS* начал работать на орбите вокруг Земли в декабре 2019 года и уже совершил одну самую настоящую революцию. Мало кто заметил,

но в 2019 году мы перешли от поиска новых экзопланет к изучению характеристик уже открытых. В основном речь идет об определении радиусов планет размером с Землю, суперземель и планет размером с Нептун, масса которых уже известна, а также об уточнении размеров известных транзитных планет.

Ожидается, что в октябре 2021 года[87] долгожданный телескоп «Джеймс Уэбб», самый большой из когда-либо созданных космических телескопов, с составным главным зеркалом размером 6,5 м, начнет изучать небо в инфракрасном диапазоне волн. Для ученых, занимающихся исследованиями экзопланет, это важно потому, что основной световой поток от планет приходится на переотраженный свет в инфракрасной области. Изучение характеристик этого света сделает возможным обнаружение и исследование атмосфер даже у скалистых суперземель.

Перелом в изучении экзопланет может наступить в 2025–2026 годах. В 2025 году в Чили «первый свет» должен увидеть телескоп *ELT* с радиусом зеркала 39,3 м. Благодаря своим размерам и первоклассным инфракрасным спектрографам *HARMONI* и *METIS* он станет революционным аппаратом для прямой визуализации экзопланет. Его инструменты позволят получать дневные и ночные спектры газообразных экзопланет и даже изучать погодные условия на планетах-гигантах.

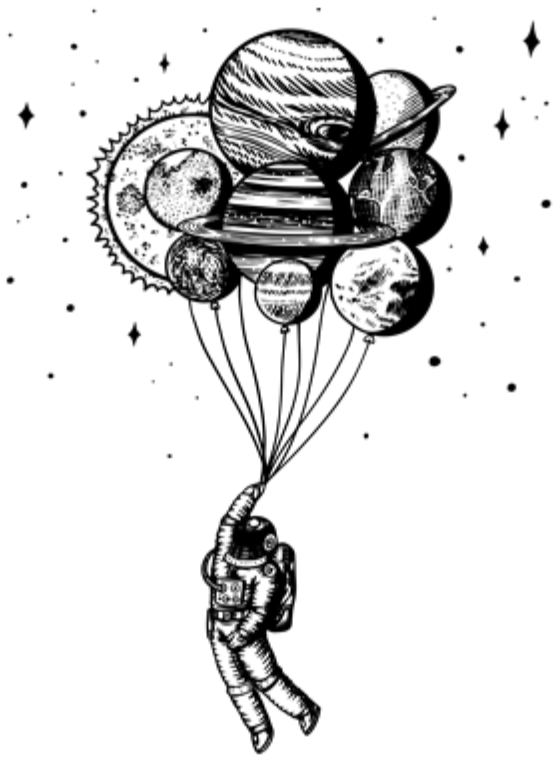
А в 2026 году начнется миссия *PLATO*. Как и *CHEOPS*, этот космический телескоп сосредоточится на изучении уже открытых экзопланет. Его целью станет определение характеристик скалистых планет, находящихся в зоне обитаемости у звезд солнечного типа. Также он сможет оценивать атмосферные характеристики этих планет.

* * *

В рамках этой книги я сознательно опустил обсуждение поиска разумной жизни в нашей галактике. Мне представляется, что эта область знания сейчас слишком спекулятивна и зависит по большей части от личных предпочтений ученых. Сегодня космос видится нам безжизненным и лишенным любых форм цивилизации, кроме человеческой. Эта пустота пугает. Кажется, есть какая-то страшная загадка в этом Великом молчании. Возможно, нам просто повезло. На сотнях миллиардов планет, может, и были запущены одни и те же механизмы, но всякий раз возникали непреодолимые препятствия: произошла сильная вспышка на родительской звезде; упал метеорит; какая-то форма

жизни случайно уничтожила биосферу; быть может, разумные существа истребили сами себя или же никак не могут уйти от аналога нашего каменного века. Не исключено, что доля везения, выпавшая Земле, оказалась больше, чем любому другому миру. А может, мир полон инопланетян, но они от нас скрываются и играют в свои странные, непонятные нам игры. В этой искрящейся многообразием Вселенной возможно все.

Работая над этой книгой, я не ставил перед собой цели дать вам, дорогие читатели, простые ответы на сложные вопросы. Я надеялся распахнуть перед вами окно в мистерию умопомрачительных расстояний, огромных промежутков времени и красоты, торжествующей во Вселенной. Если этой ночью вы долго не сможете заснуть, размышляя о далеких планетах, я буду считать, что у меня получилось.



Список источников

[1] Conselice C. J., et al. The evolution of galaxy number density atz< 8 and its implications // The Astrophysical Journal. 2016. 830(2), 83.

[2] Zhu W., et al. About 30 % of Sun-like Stars Have Kepler-like Planetary Systems: A Study of Their Intrinsic Architecture // The Astrophysical Journal. 2018. 860(2), 101.

[3] Heath T. Aristarchus of Samos: The Ancient Copernicus. Oxford: Clarendon Press, 1913.

[4] Gingerich O. Alfonso The Tenth as a Patron of Astronomy. In Alfonso X of Castile the Learned King (1221–1284), ed. Francisco Marquez-Villanueva and Carlos Alberto Vega. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1990.

[5] Lauretta D. S., et al. Episodes of particle ejection from the surface of the active asteroid (101955) Bennu // Science. 2019. 366(6470).

[6] Saiki T., et al. Small carry-on impactor of Hayabusa 2 mission // Acta Astronautica. 2013. 84, 227–236.

[7] Swedenborg E. (Principia) Latin: Opera Philosophica et Mineralia (English: Philosophical and Mineralogical Works). 1734.

[8] Kant I. Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels, 1755.

[9] Laplace P.-S. Exposition du systeme du monde, 1776.

[10] Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969.

[11] Montmerle T., et al. Solar System Formation and Early Evolution: the First 100 Million Years // EM&P. 2006. 98, 39–95.

[12] Bouvier A., Wadhwa M. The age of the Solar System redefined by the oldest Pb – Pb age of a meteoritic inclusion // Nature Geoscience. 2010. 3(9), 637–641.

[13] Clark P. C., et al. Star formation in unbound giant molecular clouds: the origin of OB associations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2005. 359(3), 809–818.

[14] Blum J., Wurm G. The Growth Mechanisms of Macroscopic Bodies in Protoplanetary Disks // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2008. 46(1), 21–56.

[15] Kouchi A., et al. Rapid Growth of Asteroids Owing to Very Sticky Interstellar Organic Grains // The Astrophysical Journal. 2002. 566(2), L121–L124.

[16] Youdin A. N., Goodman J. Streaming Instabilities in Protoplanetary Disks // The Astrophysical Journal. 2005. 620(1), 459–469.

[17] Weidenschilling S. J. Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1977. 180(2), 57–70.

[18] Bae J., Zhu Z. Planet-driven Spiral Arms in Protoplanetary Disks. I. Formation Mechanism // The Astrophysical Journal. 2018. 859(2), 118.

[19] Boccaletti A., et al. Possible evidence of ongoing planet formation in AB Aurigae // Astronomy & Astrophysics. 2020. 637, L5.

[20] Boley A. C., et al. Clumps in the outer disk by disk instability: Why they are initially gas giants and the legacy of disruption // Icarus. 2010. 207(2), 509–516.

[21] Helled R., Podolak M., Kovetz A. Planetesimal capture in the disk instability model // Icarus. 2006. 185(1), 64–71.

[22] Williams J. P., Cieza L. A. Protoplanetary Disks and Their Evolution // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2011. 49(1), 67–117.

[23] Наука Ренессанса. Триумфальные открытия и достижения естествознания времен Парацельса и Галилея. 1450–1630 // Боас Холл Мари. Пер. с англ. Л.А. Игоревского. – М.: Центрполиграф, 2014.

[24] Данилов Ю. А., Смородинский Я. А. Иоганн Кеплер: от «мистерии» до «гармонии» // УФН. 1973. № 109. С. 175–209.

[25] Drake S. Galileo at Work: His Scientific Biography. University of Chicago Press, 1979.

[26] Предтеченский Е. А. Галилео Галилей. Его жизнь и научная деятельность. СПб.: типография Высочайше утвержденного товарищества «Общественная польза», 1891.

[27] ALMA Partnership et al. The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region // The Astrophysical Journal Letters. 2015. 808(1), L3.

[28] Kahanamoku S., et al. A Native Hawaiian-led summary of the current impact of constructing the Thirty Meter Telescope on Maunakea. Submitted to the National Academy of Sciences Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics (Astro2020). Panel on the State of the Profession and Societal Impacts (SoP).

[29] Kraus A. L., Ireland, M. J. LkCa 15: A Young Exoplanet Caught at Formation? // The Astrophysical Journal. 2012. 745(1).

[30] Ribas I., et al. A candidate super-Earth planet orbiting near the snow line of Barnard's star // Nature. 2018. 563(7731), 365–368.

[31] Struve O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work // The Observatory. 1952. 72, 199–200.

[32] Hewish A., et al. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source // Nature. 1968. 217(5130), 709–713.

[33] Pilkington J. D. H., et al. Observations of some further Pulsed Radio Sources // Nature. 1968. 218(5137), 126–129.

[34] Wolszczan A., Frail D. A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12 // Nature. 1992. 355(6356), 145–147.

[35] Downs G. S. Interplanetary Navigation Using Pulsating Radio Sources. NASA Tech. Rep. 74N34150 (JPL Tech. Rep. 32-1594), Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA. 1974.

[36] Witze A. NASA test proves pulsars can function as a celestial GPS // Nature. 2018. 553(7688), 261–262.

[37] Shemar S., et al. Towards practical autonomous deep-space navigation using X-Ray pulsar timing // Experimental Astronomy. 2016. 42, 101–138.

[38] Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. М.: АСТ, 2018.

[39] Herschel W. (n.d.). Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of the Sun // The Scientific Papers of Sir William Herschel. 1800. 70–76.

[40] Wollaston W. H. A Method of Examining Refractive and Dispersive Powers, by Prismatic Reflection // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1802. 92(0), 365–380.

[41] Fraunhofer J. First as lectures to the Munich Academy of Sciences in 1814 and 1815, printed in: Denkschriften der Münch. Akademie der Wissenschaften. 1817. 5, 193–226.

[42] Kirchhoff G. Uber den Zusammenhang zwischen Emissionund Absorption von Licht und Warme // Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, sessions of Dec. 1859. 1860. 783–787.

[43] Fizeau H. Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle // Annales de chimie et de physique. 1870. 19(4), 211.

[44] Huggins W. XXI. Further observations on the spectra of some the stars and nebulae, with an attempt to determine therefrom whether these bodies are moving towards or from the earth, also observations on the spectra of the sun and of comet II., 1868 // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1869. 158(II), 529.

[45] Griffin R. F. A photoelectric radial-velocity spectrometer. The Astrophysical Journal. 1967. 148, 465–476.

[46] Andersen J. et al. Radial velocities of southern stars obtained with the photoelectric scanner CORAVEL. III – 790 late-type bright stars // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 1985. 59, 15–36.

[47] Griffin R. R. Accurate Wavelengths of Stellar and Telluric Absorption Lines Near 7000 A // Monthly Notices of the Royal

Astronomical Society. 1973. 162(3), 255–260.

[48] Campbell B., Walker G. A. H. Precision radial velocities with an absorption cell // PASP. 1979. 91, 540–545.

[49] Campbell B., Walker G. A. H., Yang S. A search for substellar companions to solar-type stars // The Astrophysical Journal. 1988. 331, 902–921.

[50] Latham D. W., et al. The unseen companion of HD114762: a probable brown dwarf // Nature. 1989. 339(6219), 38–40.

[51] Patience J., et al. Stellar Companions to Stars with Planets // The Astrophysical Journal. 2002. 581(1), 654–665.

[52] Kane S. R., Gelino, D. M. Distinguishing between stellar and planetary companions with phase monitoring // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2012. 424(1), 779–788.

[53] Kiefer F. Determining the mass of the planetary candidate HD 114762 b using Gaia // Astronomy & Astrophysics. 2019. 632, L9.

[54] Mayor M., Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star // Nature. 1995. 378(6555), 355–359

[55] Dawson R. I., Johnson, J. A. Origins of Hot Jupiters // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2018. 56(1), 175–221.

[56] Charbonneau D., et al. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star // The Astrophysical Journal. 2000. 529(1), L45–L48.

[57] Henry G. W., et al. A Transiting “51 Peg – like“ Planet // The Astrophysical Journal. 2000. 529(1), L41–L44.

[58] Vidal-Madjar A., et al. Magnesium in the atmosphere of the planet HD 209458 b: observations of the thermosphere-exosphere transition region // Astronomy & Astrophysics. 2013. 560, A54, 12.

[59] Gaudi B. S., et al. A giant planet undergoing extreme-ultraviolet irradiation by its hot massive-star host // Nature. 2017. 546, 514–518.

[60] Webb G. E. The Planet Mars and Science in Victorian America // The Journal of American Culture.1980. 3(4), 573–580.

[61] Raymond S. N., et al. Building the terrestrial planets: Constrained accretion in the inner Solar System // Icarus. 2009. 203(2), 644–662.

[62] Goldreich P., Tremaine S. Disk-Satellite Interactions // The Astrophysical Journal. 1980. 241(1), 425–441.

[63] Walsh K. J., et al. A low mass for Mars from Jupiter’s early gas-driven migration // Nature. 2011. 475(7355), 206–209.

[64] Tsiganis K., et al. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System // Nature. 2005. 435(7041), 459–461.

[65] Bailey E., Batygin K. The Hot Jupiter Period – Mass Distribution as a Signature of in situ Formation // The Astrophysical Journal. 2018. 866(1), L2.

[66] Mann A. Bashing holes in the tale of Earth’s troubled youth //

Nature. 2018. 553(7689), 393–395.

[67] Potter R. W. K., Head, J. W. Basin formation on Mercury: Caloris and the origin of its low-reflectance material // Earth and Planetary Science Letters. 2017. 474, 427–435.

[68] Blewett D. T., et al. Analysis of MESSENGER high resolution images of Mercury's hollows and implications for hollow formation // Journal of Geophysical Research: Planets. 2016. 121, 1798–1813.

[69] Delitsky M. L., et al. Ices on Mercury: Chemistry of volatiles in permanently cold areas of Mercury's north polar region // Icarus / 2017. 281, 19–31.

[70] Jones B. M., Sarantos M., Orlando T. M. A New In Situ Quasi-continuous Solar-wind Source of Molecular Water on Mercury // The Astrophysical Journal. 2020. 891(2).

[71] Ferriere L., et al. Shock Metamorphism of Bosumtwi Impact Crater Rocks, Shock Attenuation, and Uplift Formation // Science. 2008. 322(5908), 1678–1681.

[72] Hauck S. A., et al. The curious case of Mercury's internal structure // Journal of Geophysical Research: Planets. 2013. 118, 1204–1220.

[73] Ebel D. S., Stewart S. T. The elusive origin of Mercury. In Mercury: The view after MESSENGER (Vol. 21). Cambridge University Press, 2018.

[74] Benz W., et al. The Origin of Mercury / Edited by A. Balogh, L. Ksanfomality, R. von Steiger // Mercury. Space Sciences Series of ISSI (Vol. 26). Springer, New York, NY, 2008.

[75] Lewis J. S. Chemistry of the planets // Annual Review of Physical Chemistry. 1973. 24(1), 339–351.

[76] Cameron A. G. W. The partial volatilization of Mercury // Icarus. 1985. 64(2), 285–294.

[77] Spalding C., Adams F. C. The Solar wind prevents re-accretion of debris after Mercury's giant impact. 2020.

[78] McArthur B. E., et al. Detection of a Neptune-Mass Planet in the ρ1 Cancri System Using the Hobby-Eberly Telescope // The Astrophysical Journal. 2004. 614(1), L81–L84.

[79] Winn J. N., et al. A super-earth transiting a naked-eye star // The Astrophysical Journal. 2011. 737(1), L18.

[80] Madhusudhan N., Lee K. K. M., Mousis O. A possible carbon-rich interior in super-earth 55 Cancri e // The Astrophysical Journal. 2012. 759(2), L40.

[81] Demory B.-O., et al. A map of the large day – night temperature gradient of a super-Earth exoplanet // Nature. 2016. 532(7598), 207–209.

[82] Angelo I., Hu R. A Case for an Atmosphere on Super-Earth 55 Cancri e // The Astronomical Journal. 2017. 154(6), 232.

[83] Hatzes A. P., et al. A Planetary Companion to Gamma Cephei A // The Astrophysical Journal. 2003. 599(2), 1383–1394.

[84] Li X., Liao S. More than six hundred new families of Newtonian periodic planar collisionless three-body orbits // Science China: Physics, Mechanics and Astronomy. 2017. 60, 129511.

[85] Pascucci I., et al. Medium-Separation Binaries Do Not Affect the First Steps of Planet Formation // The Astrophysical Journal. 2008. 673, 477.

[86] Doyle L. R., et al. Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet // Science. 2011. 333(6049), 1602–1606.

[87] Dumusque X., et al. An Earth-mass planet orbiting Centauri B // Nature. 2012. 491(7423), 207–211.

[88] Rajpaul V., Aigrain S., Roberts S. Ghost in the time series: no planet for Alpha Cen B // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. 2015. 456(1), L6–L10.

[89] Anglada-Escude G., et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri // Nature. 2016. 536, 437–440.

[90] Iess L., et al. The Gravity Field and Interior Structure of Enceladus // Science, 344(6179), 78–80 (2014).

[91] Iess L. The Tides of Titan // Science. 2012. 337(6093), 457–459.

[92] Brown M. E., Trujillo C., Rabinowitz D. Discovery of a Candidate Inner Oort Cloud Planetoid // The Astrophysical Journal. 2004. 617(1), 645–649.

[93] Brown M. E., Trujillo C. A., Rabinowitz D. L. Discovery of a Planetary-sized Object in the Scattered Kuiper Belt // The Astrophysical Journal. 2005. 635(1), L97–L100.

[94] Van Elteren A., et al. Survivability of planetary systems in young and dense star clusters // Astronomy & Astrophysics. 2019. 624, A120.

[95] Nesvorny D. Young solar system's fifth giant planet // The Astrophysical Journal. 2011. 742(2), L22.

[96] Liu M. C., et al. The extremely red, young l dwarf pso j318.5338–22.8603: a free-floating planetary-mass analog to directly imaged young gas-giant planets // The Astrophysical Journal. 2013. 777(2), l20.

[97] Gahm G. F., et al. Globulettes as Seeds of Brown Dwarfs and Free-Floating Planetary-Mass Objects. The Astronomical Journal. 2007. 133(4), 1795–1809.

[98] Gahm G. F., et al. Mass and motion of globulettes in the Rosette Nebula // Astronomy & Astrophysics. 2013. 555, A57.

[99] Bailey V., et al. HD 106906 b: a planetary-mass companion outside a massive debris disk // The Astrophysical Journal. 2013.

780(1), L4.

[100] Mroz P., et al. No large population of unbound or wide-orbit Jupiter-mass planets // Nature. 2017. 548(7666), 183–186.

[101] Oasa Y., Tamura M., Sugitani K. A Deep Near-Infrared Survey of the Chamaeleon I Dark Cloud Core // The Astrophysical Journal. 1999. 526(1), 336–343.

[102] Jewitt D., Luu J. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1 // Nature. 1993. 362(6422), 730–732.

[103] Marcy G. W., et al. Masses, radii, and orbits of small kepler planets: the transition from gaseous to rocky planets // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2014. 210(2), 20.

[104] Borucki W. J., et al. Kepler-22b: A 2.4 Earth-radius planet in the habitable zone of a sun-like star // The Astrophysical Journal. 2012. 745(2), 120.

[105] Charbonneau D., et al. A super-Earth transiting a nearby low-mass star // Nature. 2009. 462(7275), 891–894.

[106] Kreidberg L., et al. Clouds in the atmosphere of the super-Earth exoplanet GJ 1214b // Nature. 2014. 505(7481), 69–72.

[107] Bolmont E., et al. Formation, tidal evolution, and habitability of the kepler-186 system // The Astrophysical Journal. 2014. 793(1), 3.

[108] Joshi M. Climate Model Studies of Synchronously Rotating // Astrobiology. 2003. 3(2), 415–427.

[108] Koll D. D. B., Abbot, D. S. Temperature structure and atmospheric circulation of dry tidally locked rocky exoplanets // The Astrophysical Journal. 2016. 825(2), 99.

[109] Shan Y., Li G. Obliquity Variations of Habitable Zone Planets Kepler-62f and Kepler-186f // The Astronomical Journal. 2018. 155(6), 237.

[110] Cockell C. S., et al. Habitability: A Review // Astrobiology. 2016. 16(1), 89–117.

[111] Weiss M. C., et al. The last universal common ancestor between ancient Earth chemistry and the onset of genetics // PLOS Genetics. 2018. 14(8), e1007518.

[112] Ball P. Water as an Active Constituent in Cell Biology // Chemical Reviews. 2008. 108(1), 74–108.

[113] Spiga R., et al. The origin of water on Earth: stars or diamonds? // Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali. 2019. 30, 261–268.

[114] Tschauner O., et al. Ice-VII inclusions in diamonds: Evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle // Science. 2018. 359(6380), 1136–1139.

[115] Rumble D., et al. The oxygen isotope composition of earth's oldest rocks and evidence of a terrestrial magma ocean //

Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. 14(6), 1929–1939.

[116] Touboul M., et al. Tungsten isotopes in ferroan anorthosites: Implications for the age of the Moon and lifetime of its magma ocean // Icarus. 2009. 199(2), 245–249.

[117] Koeberl C. Impact Processes on the Early Earth // Elements. 2006. 2(4), 211–216.

[118] Srinivasan P., et al. Silica-rich volcanism in the early solar system dated at 4.565 Ga // Nature Communications. 2018. 9(1).

[119] Valley J. W., et al. A cool early Earth // Wilde in Geology. 2002. 30(4), 351–354.

[120] Dodd M., et al. Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates // Nature. 2017. 543, 60–64.

[121] Dodd M. S., et al. Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates // Nature. 2017. 543(7643), 60–64.

[122] Bell E. A., et al. Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2015. 112(47), 14518–14521.

[123] Sugitani K., et al. Early evolution of large micro-organisms with cytological complexity revealed by microanalyses of 3.4 Ga organic-walled microfossils // Geobiology. 2015. 13, 507–521.

[124] Miller S. L. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions // Science. 1953. 117(528).

[125] Zahnle K., et al. Earth's Earliest Atmospheres // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. 1010. 2(10).

[126] Ehrefreund P., et. al. Astrophysical and astrochemical insights into the origin of life // Reports on Progress in Physics. 2002. 65(10), 1427–1487.

[127] Rich A. On the problems of evolution and biochemical information transfer. / Edited by M. Kasha and B. Pullman // Horizons in Biochemistry. New York: Academic Press, 1962.

[128] Segre D., et al. The Lipid World // Origins of Life and Evolution of Biospheres. 2001. 31, 119–145.

[129] Pereto J. Controversies on the origin of life // International Microbiology. 2005. 8, 23–31.

[130] Vlassov A. How was Membrane Permeability Produced in an RNA World? // Origins of Life and Evolution of Biospheres. 2005. 35(2), 135–149.

[131] Russell M. J., Hall A. J. The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front // The Geological Society of London.1997. 154, 377–402.

[132] Luo G., et al. Rapid oxygenation of Earths atmosphere 2.33 billion years ago // Science Advances. 2016. 2(5).

[133] Bar-On Y. M., Phillips R., Milo R. The biomass distribution on Earth // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018.

115(25), 6506–6511.

[134] Hynek B. M., Beach M., Hoke M. R. T. Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes // Journal of Geophysical Research. 2010. 115(E9).

[135] Bibring J.-P., et al. Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data // Science. 2006. 312(5772), 400–404.

[136] Feldman W. C. Global distribution of near-surface hydrogen on Mars // Journal of Geophysical Research. 2004. 109(E9).

[137] Orosei R., et al. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars // Science. 2018. 361(6401), 490–493.

[138] Ojha L., et. al. Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars // Nature Geoscience. 2015. 8(11), 829–832.

[139] Cheptsov V. S., et al. 100 kGy gamma-affected microbial communities within the ancient Arctic permafrost under simulated Martian conditions // Extremophiles. 2017. 21(6), 1057–1067.

[140] Levin G. V., Straat P. A. Viking labeled release biology experiment: interim results // Science. 1976. 194(4271), 1322–1329.

[141] Levin G. V., Straat P. A. The Case for Extant Life on Mars and Its Possible Detection by the Viking Labeled Release Experiment // Astrobiology. 2016. 16(10).

[142] Sullivan W. Two gases associated with life found on Mars near polar cap // The New York Times. 1969. August 8, 1.

[143] Webster C. R., et al. Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations // Science. 2018. 360(6393), 1093–1096.

[144] Geminale A., Formisano V., Giuranna M. Methane in Martian atmosphere: Average spatial, diurnal, and seasonal behavior // Planetary and Space Science. 2008. 56(9), 1194–1203.

[145] Korablev O., et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations // Nature. 2019. 568, 517–520.

[146] Trainer M. G., et al. Seasonal variations in atmospheric composition as measured in Gale Crater, Mars // Journal of Geophysical Research: Planets. 12 November 2019.

[147] James P. B., Kieffer H. H., Paige D. A. The seasonal cycle of carbon dioxide on Mars / Edited by H. H. Kieffer. Tuscon, Arizona: University of Arizona Press, 1992.

[148] Gibson E. K., et al. The case for relic life on Mars // Scientific American. 1997. 277, 58–65.

[149] McKay D. S., et al. Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001 // Science. 1996. 273, 924–930.

[150] Martel J., et al. Biomimetic properties of minerals and the search for life in the Martian meteorite ALH84001 // The Annual Review of Earth and Planetary. 2012. 40, 167–193.

[151] White L. M., et al. Putative Indigenous Carbon-Bearing Alteration Features in Martian Meteorite Yamato 000593 // Astrobiology. 2014. 14(2), 170–181.

[152] Sagan C., et al. A search for life on Earth from the Galileo spacecraft // Nature. 1993. 365(6448), 715–721.

[153] Schwieterman E. W., et al. Exoplanet Biosignatures: A Review of Remotely Detectable Signs of Life // Astrobiology. 2018. 18(6), 663–708.

[154] Reinhard C. T., et al. False Negatives for Remote Life Detection on Ocean-Bearing Planets: Lessons from the Early Earth // Astrobiology. 2017. 17(4), 287–297.

[155] Harman C. E., et al. Abiotic O2 levels on planets around F, G, K, and M stars: possible false positives for life // The Astrophysical Journal. 2015. 812(2), 137.

[156] Atreya S. K., Mahaffy P. R., Wong A.-S. Methane and related trace… implications for life, and habitability // Planetary and Space Science. 2007. 55, 358–369.

[157] Klein F., et al. Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2019. 116(36), 17666-17672.

[158] Gillon M., et al. Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star // Nature. 2016. 533(7602), 221–224.

[159] Gillon M., et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1 // Nature. 2017. 542(7642), 456–460.

[160] Morley C. V., et al. Observing the Atmospheres of Known Temperate Earth-sized Planets with JWST // The Astrophysical Journal. 2017. 850(2), 121.

[161] Lincowski A. P., et al. Evolved Climates and Observational Discriminants for the TRAPPIST-1 Planetary System // The Astrophysical Journal. 2018. 867(1), 76.

[162] Tsiaras A., et al. Water vapour in the atmosphere of the habitable-zone eight-Earth-mass planet K2-18 b // Nature Astronomy. 2019. 3, 1086–1091.

[163] Benneke B., et al. Water Vapor and Clouds on the Habitable-zone Sub-Neptune Exoplanet K2-18b // The Astrophysical Journal. 2019. 887(1), L14.

notes

Примечания

1

Для полноты картины следует заметить, что центр каждой планеты, по Копернику, располагается рядом с центром Солнца, но не в центре. В этом смысле его систему нельзя называть гелиоцентрической. – *Здесь и далее примеч. автора.*

2

Когда я пишу эти строки, мне на ум приходит афоризм Дэвида Мермина «Заткнись и вычисляй!», имеющий отношение, правда, к совершенно другой эпохе и проблемам совершенно иного рода.

3

Градус Кельвина (К) равен по величине градусу Цельсия (°С). Разница лишь в том, что принимается за ноль в этих двух системах измерения температур. В системе Цельсия это точка замерзания воды при нормальном давлении, а в системе Кельвина – минимальная температура, которую может иметь физическое тело. Таким образом, 0 °С соответствуют 273 К.

4

Цвет звезды зависит от ее температуры. Самые горячие звезды светят преимущественно в бело-голубых тонах, а самые холодные – в красных.

5

На самом деле классификаций звезд больше, а приведенную в тексте можно легко запомнить по мнемоническому правилу «Один Бритый Англичанин Финики Жевал, Как Морковь».

6

Если однажды капитан Джеймс Кирк предложит вам прокатиться на «Энтерпрайзе» по какой-нибудь галактике, хорошо подумайте, перед тем как взойти на борт этого корабля, имеющего максимальную скорость всего 9 000 скоростей света!

7

Свидетелем падения метеорита *Weston* в 1807 году в штате Коннектикут (США) стал некий судья Уиллер. Он сообщил об этом событии в Йельский университет, и к расследованию необычного происшествия приступили два уважаемых и скептически настроенных профессора. Они нашли осколки метеорита и не могли взять в толк, что это и как сюда попало. В конце концов им осталось признать, что «должно быть, камни упали с неба». История дошла до Белого дома, но Томас Джефферсон, в то время президент США, не поверил выводам судей, заявив: *«Gentlemen, I would rather believe that two Yankee professors would lie than believe that stones fall from heaven»*.

8

Частота волны – это число колебаний в единицу времени (например, за 1 секунду). Для звуковых волн увеличение частоты приводит к росту высоты звука.

9

Перигелий – ближайшая к Солнцу точка орбиты небесного тела, а афелий – самая дальняя.

10

Замкнутые орбиты всех небесных тел (и искусственных спутников) имеют форму эллипса, в одном из фокусов которого обычно находится массивное тело. Ближайшая к этому телу точка орбиты другого тела или спутника называется перицентром, а самая дальняя – апоцентром.

11

На самом деле еще в 2001 году космический аппарат *NEAR Shoemaker* совершил первую успешную мягкую посадку на астероид Эрос, но она была импровизацией команды управления. Главная задача аппарата состояла все же в выходе на орбиту вокруг астероида.

12

Ожидается, что это произойдет 6 декабря 2020 года.

13

Для автора это событие еще в будущем. Но если вы читаете эту книгу после 2020 года, для вас оно наверняка уже в прошлом.

14

Если быть точным, Исаак Ньютон (1643–1727) застал живого Рене Декарта (1596–1650), хоть в те годы еще не мог вести с ним научные беседы. Сама теория появилась за десять лет до рождения Ньютона, но опубликована она была только через десять лет после смерти Декарта.

15

От латинского *nebula* – «туман».

Это вызвано тем, что для всех участков облака должна сохраняться такая физическая величина, как угловой момент, пропорциональный скорости этого участка и расстоянию до центра вращения. Если радиус вращения уменьшается, то скорость должна возрасти, чтобы угловой момент не изменился.

Поэтому протопланетные диски называют также аккреционными. Аккреционные диски возникают не только вокруг звезд, а могут окружать даже черные дыры.

18

Да, астрофизический лабораторный эксперимент наконец-то стал реальностью. Остается только мечтать, что однажды реальностью станет и космологический лабораторный эксперимент.

19

Метровый барьер – не единственное препятствие для твердого вещества в протопланетном диске, которое мешает ему вырасти до размеров планеты. Астрофизики сегодня говорят о четырех барьерах, сопровождающих аккреционный рост планет, преодоление каждого из которых нуждается в объяснении.

20

Так называют выпуклые многогранники, состоящие из правильных многоугольников: это тетраэдр, гексаэдр, октаэдр, додекаэдр, икосаэдр.

21

В современном значении этого слова: то есть здание, предназначенное для астрономических наблюдений.

22

В те времена люди любили называть свои книги длинно и развернуто. Так, полное название этой книги звучит: «Новая астрономия, причинно обоснованная, или небесная физика, основанная на комментариях к движениям звезды Марс, наблюдавшимся достопочтенным Тихо Браге».

23

Позволю себе вставить здесь философское замечание. Сами по себе наблюдения, кроме эмпирических данных, не дают ничего. Наука начинается тогда, когда ученые пытаются объяснить наблюдаемые явления и, самое главное, предсказать еще не обнаруженные. Например, наблюдение за звездами дает лишь знание характеристик испускаемого ими света – теории же, созданные физиками, позволяют описать термоядерные реакции, идущие в недрах звезд, по спектру определить состав звезд и их температуру, а также предсказать их будущее.

24

Да, астрономы очень оригинальны с названиями телескопов.

25

И все же это возможно: недавно с помощью радиотелескопа *VLA* был обнаружен газовый гигант по генерируемому им радиоизлучению (подробнее в статье *Kao M., Hallinan G., Pineda J. S., Stevenson D., Burgasser A. The Strongest Magnetic Fields on the Coolest Brown Dwarfs // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2018. Vol. 237. N 2.*

То есть начал осуществлять астрономические наблюдения.

Он пытался определить изменение расстояния между двумя звездами – то есть решить более легкую задачу, чем определение годового параллакса.

28

Правнук Василия Яковлевича Струве, первым вычислившего параллакс *p* Альтаира.

К слову, через несколько лет незаменимыми работниками в уже функционирующем массиве оказались овцы, лучше и деликатнее справлявшиеся с уничтожением травы, чем газонокосилки в руках студентов.

30

Чем дальше радиоисточники от нас, тем лучше. Если взрыв сверхновой произойдет в окрестностях Солнца, он убьет все живое на нашей планете.

31

Аббревиатура *PSR* расшифровывается как *pulsating radio source* («пульсирующий радиоисточник»), а цифры обозначают положение на небе.

Более подробно история спектроскопии описана в прекрасной книге *Hearnshaw J. B. The Analysis of Starlight: Two Centuries of Astronomical Spectroscopy. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.*

33

Переменные звезды – звезды, яркость которых меняется со временем. Магеллановo облако – карликовая галактика, спутник Млечного Пути.

34

Коричневый карлик – субзвездный объект, то есть промежуточный между планетой и звездой. Обладает достаточной массой, чтобы переплавлять водород в гелий, но способен поддерживать и менее энергоемкие ядерные реакции.

35

Аналогом степени *Doctor of Philosophy*, или *PhD*, в России служит степень кандидата наук.

Именно с помощью этого телескопа в 1999 году на Марсе нашли метан.

37

С этого момента приходится использовать заглавные буквы, чтобы различать звезды в этой системе.

38

WASP (*Wide Angle Search for Planets*) – проект поиска экзопланет, объединяющий несколько научных групп.

39

Названа по имени телескопа *KELT*, с помощью которого и была обнаружена.

40

Спустя 10 лет наши знания об экзопланетах чуть менее скромны.

41

Интересно, что еще в 1727 году Джонатан Свифт в «Путешествиях Гулливера» предсказал, что у Марса есть два спутника.

42

Конечно, что-то пошло не так только с точки зрения землян. Марсианский микроб наверняка считает, что его родная планета – самое приятное место во Вселенной.

43

Падающие на планету лучи света поглощаются ее поверхностью и переизлучаются в атмосферу в виде инфракрасного, или теплового, излучения. В свою очередь, это излучение переотражается некоторыми газами, которые называют парниковыми, обратно на поверхность и нагревает нижние слои атмосферы. Это похоже на то, как «работает» теплица на садовом участке, с той лишь разницей, что в данном случае теплица – вся планета. В 2015 году Илон Маск предложил взорвать на Марсе ядерные бомбы, чтобы растопить на полюсах шапки из CO_2, одного из лучших парниковых газов, и таким образом сделать Марс пригодным для колонизации.

Такую область пространства астрономы называют сферой Хилла.

Есть еще миграция III типа, но даже теоретически она реализуется в достаточно экстремальных случаях.

Этот процесс называется динамическим трением.

MESSENGER – от англ. *MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging.*

Среди этих планет есть названные в честь тех самых Иоанна Липперсгея и Захария Янсена, которые оспаривают у Галилея звание изобретателя телескопа. Томас Хэрриот – человек, обладавший впечатляющим математическим талантом и не менее впечатляющей скромностью. Чтобы не лишать вас удовольствия узнать об этом человеке самостоятельно, я не скажу о нем здесь больше ни слова.

Подобное описание планеты можно найти в книге *Summers M., Trefil J. Exoplanets: Diamond Worlds, Super Earths, Pulsar Planets, and the New Search for Life beyond Our Solar System. Smithsonian, 2017.*

Детали этой истории я рассказывал в шестой главе.

Например, представьте себе шарик, находящийся в желобе, – его положение устойчиво, ведь даже если его подтолкнуть, он в конце концов все равно займет исходное положение. Напротив, шарик, расположенный на вершине крутого холма, пребывает в крайне неустойчивом положении.

Вообще говоря, существуют еще орбиты *L*-типа, находясь на которых планеты движутся вокруг точек Лагранжа *L*4 и *L*5.

Кстати, брат Джона Нолла Томас, в те времена еще студент, создал программу обработки изображений *Photoshop* в качестве своего летнего проекта. В дальнейшем Джон продал программу брата компании *Adobe*.

В оригинале его высказывание выглядит так: *«Again and again we see that the science is stranger and weirder than fiction. The very existence of this discovery gives us cause to dream bigger».*

55

Первый белый карлик открыл Уильям Гершель.

Ее величина зависит от неизвестного угла наклона орбиты.

57

Подробное жизнеописание Гершеля можно найти в прекрасной, но, к сожалению, пока не переведенной на русский язык книге: *Hoskin M. William and Caroline Herschel: Pioneers in Late 18th-Century Astronomy. SpringerBriefs in Astronomy. Springer, 2014*.

Это означает, что расстояние между основным зеркалом и отражателем равно почти двум метрам. Сегодня когда мы говорим, например, о 6-метровом телескопе, то имеем в виду не величину фокусного расстояния, а диаметр зеркал.

59

Account of some observations tending to investigate the construction of the heavens.

60

Группу из четырех открытых спутников Юпитера Галилей назвал «звезды Медичи» в честь четырех братьев Медичи.

61

Фазовое состояние водорода, которое он приобретает, находясь под крайне высоким давлением.

Скорее всего, они оказались бы микробами, конечно, но так ли это важно?

63

Один из прекрасных примеров сотрудничества космических агентств. «Кассини» был построен на деньги *NASA*, а «Гюйгенс» принадлежал Европейскому космическому агентству. Антенна дальней связи и радарный высотометр сконструировали специалисты Итальянского космического агентства.

Карликовые планеты, орбиты которых лежат за Нептуном, называются плутоидами – в честь Плутона, открытого первым и являющегося крупнейшим телом этого класса.

65

Как убедительно показали исследования, проведенные зондом *InSight*, на Марсе до сих пор случаются «марсотрясения» (что позволяет считать эту планету геологически живым миром с горячим ядром). Причина этих марсотрясений – охлаждение и сжимание марсианской коры. Это же явление ответственно за образование трещин на поверхности Меркурия.

На самом деле с помощью метода микролинзирования ищут и экзопланеты, обращающиеся вокруг своих звезд. Например, планета *OGLE*-2013-*BLG*-0341 *B b* у двойной звезды, как уже видно из названия, была найдена этим методом.

В данном случае подо льдом понимается не только водяной лед, но и лед из метана, аммиака и других летучих веществ.

Интересные мысли на этот счет можно почитать в блоге Майкла Брауна на сайте Калтеха, в статье *How many dwarf planets are there in the outer solar system?* (*http://web.gps.caltech.edu/~mbrown/dps.html*).

69

См. следующую главу.

70

С 2006 года на орбите находится телескоп *COROT* – первый космический телескоп, использующий транзитный метод для открытия экзопланет. Сегодня на счету этого телескопа около 30 открытых экзопланет.

Rogers L. A., Seager S. Three Possible Origins for the Gas Layer on GJ 1214b // The Astrophysical Journal. 2010. Vol. 716. N 2. P. 1208–1216.

Согласно гипотезе «Земли-снежка» это происходило несколько раз в период между 750 и 550 миллионами лет назад.

Подробнее в книге Лэйн Н. Энергия, секс, самоубийство. Митохондрии и смысл жизни. Питер, 2016.

У вирусов роль ДНК исполняет РНК.

В английской литературе для этого термина используется сокращение *LUKA – the Last Universal Common Ancestor*.

76

Дейтерий – изотоп водорода, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона.

77

Так называемые кометы главного пояса.

78

Восемнадцатью годами ранее, в 1934 году, Гарольд Юри получил Нобелевскую премию за открытие дейтерия.

Количество ДНК не говорит напрямую о сложности организма: например, у амебы *Amoeba dubia* геном почти в 200 раз больше, чем у человека, хотя устроена она значительно проще.

80

Митохондрии – органеллы (внутриклеточные структуры), отвечающие за синтез АТФ.

81

Первая глава «Путеводителя вольного путешественника во времени» должна начинаться со слов о том, что микроскоп – самый важный инструмент из всех и его нужно всегда иметь при себе. Он точно поможет вам не умереть со скуки где-нибудь в мезопротерозое.

82

Цитата из книги Карла Сагана «Космос: Эволюция Вселенной, жизни и цивилизации».

Благодаря этому факту была составлена трехмерная карта подледного рельефа Антарктиды.

В широком смысле биомаркер – это биологический признак состояния организма (например, он может указывать на наличие заболевания) или биологической системы. Иногда понятия «биомаркер» и «биосигнатура» используются как синонимы.

Krasnopolsky V. A., Maillard J. P., Owen T. C. Detection of methane in the martian atmosphere: Evidence for life? // Icarus. 2004. Vol. 172. P. 537–547.

86

Фотолиз – это химическая реакция расщепления химических соединений под действием света.

Изначально телескоп хотели запустить в 2007 году, затем активно готовились к запуску в 2015–2016 годах.